



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

嵌入式系统在 智能电器和能源管理 中的应用

**Embedded Systems for
Smart Appliances and Energy Management**

[德] Christoph Grimm
Peter Neumann 编著
[意] Stefan Mahlkecht
王永 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于本书

本书系统地介绍了嵌入式系统在智能电器与能源管理方面的应用，首次从多学科融合的角度将包括嵌入式系统、信息技术以及电力工程在内的多种技术加以整合。本书涵盖的内容包括：未来配电网络面临的挑战、智能电器的能耗管理、微型发电设备、需求一响应管理、超低能耗待机、智能待机以及家庭与楼宇自动化的通信网络。



国际电气工程先进技术译丛

嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用

[德] Christoph Grimm
Peter Neumann 编著

[意] Stefan Mahlkecht
王永 译



机械工业出版社

当前社会对节能减排的呼声越来越高,国家电网也正在接纳新型清洁能源以及私有发电设备的并网,物联网正逐渐兴起,本书在这样的背景下,针对越来越复杂的能源管理需求,提出将能源管理引入用电端,通过嵌入式系统使电器智能化,与整体电网进行信息连接,共同达到能源管理的目的。与国内同类书相比,本书除概念以外更多关注现实问题,结合欧洲对相关问题的先进探索,从问题解决领域系统化地给出方向和建议。

本书的作者通过整理欧洲发达国家在能源管理方面的研究成果和有益尝试,提出了系统的解决方案,内容覆盖配电网络、智能电器的能耗管理、需求—响应管理、超低能耗待机、网络安全以及适用于电力自动化的通信网络。本书既可以供国家电网的管理人员制定策略参考,又可以供相关科研单位针对本书所提出的多种学科的课题展开深入研究,电力、通信、家电、元器件等相关企业还可以参考本书进行细分市场的产品规划与技术储备,还可作为电力工程、通信、家电、嵌入式系统等领域的科研与教学人员以及企业产品开发人员在智能电网、智能电器研究方向的参考资料。

Translation from English language edition:

Embedded Systems for Smart Appliances and Energy Management

by Christoph Grimm, Peter Neumann and Stefan Mahlke

Copyright©2013 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2013-7169号。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用/ (德) 格里姆, (德) 诺伊曼, (意) 马尔科涅彻编著; 王永译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Embedded systems for smart appliances and energy management

ISBN 978-7-111-49082-1

I. ①嵌… II. ①格…②诺…③马…④王… III. ①微处理器—系统设计—应用—控制电器②微处理器—系统设计—应用—能源管理系统 IV. ①TP332②TM571③TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 312613 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 刘怡丹 封面设计: 马精明

责任印制: 刘 岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015 年 3 月第 1 版 第 1 次印刷

169mm×239mm·8.5 印张·449 千字

0001—2800 册

标准书号: ISBN 987—7—111—49082—1

定价: 49.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

本书讲解了下一代分布式的能源系统，对西方国家智能电网现状与先进实践进行介绍，提出通过信息技术来优化电网的管理，使用智能电器与嵌入式系统实现对电网的分布式智能化管理。

电力市场的体量非常庞大，管理的瓶颈也日益显现。本书首先分析了节能减排以及越来越多的可再生能源应用为电网管理所带来的挑战，提出了分散型能源系统的概念，清晰及有说服力的论述使得非电力专业的人员也能认识到电网管理的现实问题以及合理的解决方向。书中接着对构成解决方案所需的各专业技术进行讲解与分析考量，包括智能电器建模、无线通信标准、网络安全、嵌入式平台、低功耗电源以及智能电表技术等，给出了技术原理、研究成果以及设计建议。

感谢本书的存在，翻译本书是一个愉快的过程，我本人也受益良多。书中所讨论的主题有非常多的领域等待我们去突破，去发挥我们的聪明才智。期待国内更广阔的环境以及相关企业的脱颖而出，期待这样的智能技术早日走进千家万户。

本书的翻译过程得到了何宗彬先生的大力帮助，在此表示感谢。也要感谢我的爱人，她在翻译过程中付出了很多辛苦，提供了很多帮助。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

译者

原书前言：嵌入式系统可以减少二氧化碳排放吗？

简短来说，是的。前提是我们要满足一个关键需求：我们必须广泛部署一种智能的、经济的、分布式的通信系统，一直延伸到单独的家用或办公用电器。为了理解为什么需要这样一个通信系统，我们得回顾一下整个供电系统的挑战以及它的来龙去脉。

减少二氧化碳（CO₂）的排放是全球性挑战。很明显，在未来的 CO₂ 减排战略中，像风机以及光伏这种低碳/无碳可再生能源技术将会是重要的角色。然而，我们是工作在一个没有任何商量余地的约束条件下的：维护整个配电网的稳定，这是至关重要的。因此，整体发电量必须随时与整体用电量相匹配。然而，可再生能源的生产是不稳定的，所以我们必须设法防止这种不稳定性对电网平衡的破坏。我们用来解决电网稳定性的方案必须足够强健，如果我们不想让灾难性的后果再次出现的话，例如发生在 2003 年美国东北部和中西部以及加拿大安大略省的大停电^[1]。

对于可再生能源的不稳定问题，解决方案是对它们进行智能化的管理，在发电端，同时也在用电端。我们必须使得用电量与发电量相匹配，即与现代工业化国家的现有方案相反。对于电力消耗大户，例如制造业，这种管理已经相当成熟了。相比起来，对于小型建筑物以及居民社区我们还没有采取有效的方案，可它们在整体用电量中占到了 30%，并且在 CO₂ 整体排放中贡献了 20%^[2]。

直到现在为止，电力供应都是大规模集中化的。然而可再生能源在整体发电构成中正越来越大地成为一个重要组成部分。因此我们的电力设施会快速地进化为分散式的系统，由为数庞大的小型发电设施来为局部的用户群供电。由此而大量增加的不稳定性供电无疑会给整体电网的稳定性带来风险，我们该如何解决这个问题？

面对这些挑战，信息与通信技术（Information and Communication Technologies, ICT）是一项重要的使能机制。应用这些技术，将建筑物以及单独的家用与办公用电器嵌入监测器、控制器并与发电设备相连接，将会使发电设备每分钟都能知晓本地用户的用电量及分布情况。没有了这种将发电、输电和用电设备相连的实时通信，智能能源管理将无从谈起，结果就会是不稳定的电网、频繁的断电故障。

1. 能源管理：多学科的挑战

在一个（至少是部分的）分散式系统中，并且这个系统还（至少是部分的）应用了可再生能源，智能地将能源管理与能源需求都管理起来，可不是件小事。设计一个嵌入式系统来管理、监测和控制这些用电设备，以及实现它们与发电设备的通信，是一个多学科的挑战，读者可以从本书中领会到。它需要科学家、工程师和社会学家的专业知识，来设计出经济及商业模型，来支撑这一任务的财政可行性研究，以及设计出嵌入式系统的实现。解决方案将会把经济学与电力工程、计算机科学、无线通信技术、微电子学等技术联系起来。

能源发电工业是世界上最大的工业实体。电力是以集中的方式生产的，然后单向输送给用户。然而，大型集中式发电厂是高度密集投资型的。在北海地区大型的近海风力电厂的经验表明，要保障初期投资到位的努力其难度之大，与传统的火电厂一样困难（甚至还会更难）。与之相比，分散式的小型的可再生能源发电不仅能显著减少密集投资，而且经济效益很好，可扩展性很好，还能引入客户参与。用户可以参与到全新的、区域的分散式的能源市场中，这里平衡着光伏、风力、生物燃料等能源，所有的利益相关者都能积极地发电，并以效能价格核算的方式来使用。

用电客户所购买的不仅是能源，还包括能源供给的服务，需要能源实时地供给，而不是等到下个星期。需求现场管理（Demand Site Management, DSM）这一方法被用来匹配需求与现有资源，不过它要求终端用户在使用用电设备时需要接受一些约束。对于这些约束，首要的条件是它不能显著降低用户的舒适性和方便性，否则将无法赢得广泛的用户接纳。另一方面，有些时候舒适性和方便性的降低还是可以接受的，例如客户发现遵守这些约束可以降低开销或避开价格上涨，又或者可以在紧急情况下用来确保电网的稳定。能源管理方法还可以在电力市场的效率方面起到一定的作用。供应商借助能源管理可以根据能源供需关系来调整价格，当然这种利益最大化的诉求不可以对电网的稳定性带来负面影响。

传统的电力工程所面对的都是我们熟悉的、构建完善的系统，它由传统的发电厂发电，加入有限数量的可再生能源，再输送给家庭或工厂。随着从可再生能源中获得的能源比例的提高，对电网的智能化管理的成败在于它在发电端和用电端信息双向传输的能力、收集和分析数据的能力，以及基于分析来识别和产生所需的行动和响应的能力。在基础级的解决方案中还包括能量的存储（以各种形式），以及本地化的能耗管理。

为了支持这种新的供给/需求匹配的模式，需求—响应管理（Demand Response Management, DRM）会试着根据电力供给的多少来调节用电量。给定这样一个新的结构，由一些可管理的小型的生产加消费实体（产销合一）来实现对电网的大幅增强，有两个重要的问题需要解答：

VI 嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用

● 对于电网的管理信息网络，如何解决“最后一英里”的连接问题？我们一定要这么做吗，还是我们可以开发一种单向通信的机制来大幅减少投资？

● 当 DRM 在供电者间分担负荷时，抑或是当它减少本地的发电量或者用电量时，我们如何保证公平的能源分配？

就像我们已经提及的，数据传输以及数据的分析和响应是智能能源管理的基础。既然我们获取和传输敏感数据，信息安全就会是我们关注的重点。人们当然不希望电力公司追踪他们家里的信息或者是黑客破坏他们的电力供应。所以必须时时刻刻保护数据的安全，不仅在一个设备或系统正常运转的情况下，还包括将设备安装到一个安全的网络的时候，即试运行，设备或系统在安全机制下被识别和批准的阶段。

更进一步的重要问题是成本。现阶段已有的解决方案，每个受管理的电器其“智能化”成本在几百美元，如果要在小型建筑和居民社区广泛部署，这一成本比在经济上可行的成本高出两个数量级。为了降低价格，我们需要微电子平台。欧洲的研究项目 SmartCoDe^[3] 给出估计，在大批量生产的情况下，制造每个受管理设备所必备的高集成度的微电子器件可以低于 4 美元。

然而成本往往不是惟一的问题。既然要将这些设备集成到数量巨大的电器当中，低功耗也是必需的。设计低功耗的系统级封装（System in Package, SiP）或者片上系统（System on Chip, SoC），需要整合多种不同的技术。需要各领域的重要专业知识，例如传感器/执行器技术、模拟/混合信号开发、数字设计、软件开发以及 SiP/SoC 在嵌入式系统的实现。

上述列举还远远不够完整，仍然有很多问题需要解决。这里要表明的是在如今我们所面对的各种挑战中没有哪个是通过关注单个问题就能够解决的。为了解决这些问题，每个人都需要理解全景图以及它的寓意。未来是交叉学科的。

2. 本书章节总览

本书的书名是嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用。嵌入式系统通常的含意是，将一个（微电子）系统和它的软件集成到一个大的通常是自主的系统中，用来监测或控制设备而不需要人工干预。通用的嵌入式系统的例子有，汽车的防抱死制动系统（ABS）以及装好就不用再管它的室内恒温系统。在本书中，我们把嵌入式的定义扩大为将电器集成到一个具体的用例中并考虑所有相关因素。因此本书也采用了对于学术技术出版物来说非传统的路线来讲解：在深入嵌入式系统和微电子系统“硬核”之前，在前两章先做一些铺垫。

第 1 章，使电网可靠工作的需求—响应管理（DRM）。我们详细描述了集成可再生能源到电网中所引发的挑战，以及对小规模电力消耗智能化管理的需求。

第 2 章，智能小规模分散式能源系统（IDES）。指出我们必须重新设计现有的电网结构，从一个主要是中央化的网络到一个经过完全开发的分散式的网络，

以用来应对从化石能源到可再生能源的转变。小规模分散式系统不仅贡献于能源供给，也利于未来电网的稳定，将断电区域限定在小范围。

第3章，智能电器的建模设计。我们讨论根据电网的可供电量来控制用电需求的方式与算法，以及通过建模与仿真来研究如何实现这些需求。这里主要关注小型建筑物和居民社区，我们还会引入一种新的设备分类，即耗能产品（Energy using Products, EuP）。

第4章，建筑自动化所需的无线网络通信标准。我们讨论一些有希望将能源管理集成到既有建筑中的无线通信技术，这些建筑只能有限度地进行结构改造。当然，对于新的建筑，可以将它设计成里里外外都集成能源管理，但对于所有需要装备的建筑来说它们只占一小部分。

第5章，智能嵌入式电器网络的安全。我们分析了威胁、流程和环境，进而引入了建立自动化所需的加密概念。

第6章，可供能源管理的嵌入式集成平台。对于把能源管理加入到用电产品中，并且满足严格的安全要求，以及低的功耗与成本，我们为此给出了一种高层硬件设计的建议。这个建议所采用的方法是基于平台的，这样会简化和加速微电子器件的设计，为它们在实际应用场景中所要满足的要求进行量身定制。

第7章，低功耗智能电器的供电。我们综合介绍了如何设计一个低功耗和低成本以及高效率的电源模块，包括超低的待机功耗。

在最后一章，即第8章，智能电表的能耗测量技术，我们讨论了与高度集成的智能电表相关的拓扑方面、架构方面以及电路设计方面的问题，这在本书所建议的微电子器件设计中是关键的一项特性。

3. 感谢

本书所介绍的多数成果来自欧洲委员会第七框架计划所部分资助的研究项目。在此深深地感谢这些研究成果，我们借此可以做正确的事情。

Peter Neumann 和 Christoph Grimm，汉诺威和维也纳，2012年4月。

1) Final Report on the August 14th Blackout in the United States and Canada, U. S. – Canada Power System Outage Task Force, <https://reports.energy.gov/>

2) Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, Key Insights from IEA Indicator Analysis, International Energy Agency, <http://www.iea.org>

3) www.fp7-smartcode.eu

汉诺威，德国

凯泽斯劳滕，德国

Peter Neumann

Christoph Grimm

关 键 词

第 1 章——DRM (需求—响应管理), 电网, 可靠性

第 2 章——可再生能源, IDES (智能小规模分散式能源系统), 智能电网

第 3 章——建模, 仿真, 智能电器, 能源管理, 建筑, 可再生

第 4 章——无线通信, 建筑自动化, 无线个域网

第 5 章——安全, 密钥分发, 建筑自动化, 家用, MITM (中间人攻击)

第 6 章——微电子, 平台, 能源管理, 智能电器, 无线个域网, 智能卡

第 7 章——待机功耗, 电源, 高效率, 智能电器

第 8 章——智能电表, 功率测量, ASIC (专用集成电路), 传感器接口, 微

电子

目 录

译者序

原书前言：嵌入式系统可以减少二氧化碳排放吗？

关键词

第 1 章 使电网可靠工作的 DRM	1
1 简介	1
2 电力市场的考量	2
2.1 原理	2
2.2 挑战	3
3 用户的新角色	5
3.1 用户分类	5
3.2 DRM 活动	7
3.3 电网的经济性与电网的稳定性	9
3.4 DR 系统的基础功能构成	9
3.5 具体案例：德国	10
3.6 管理最后一英里	10
4 分散式网络管理	10
4.1 与因特网的相似性	11
4.2 粗劣的分散式决策模型所产生的效果	11
4.3 学习因特网的概念	14
4.4 可用性、有效带宽与公平性	16
4.5 探讨	16
5 小结	17
参考文献	18
第 2 章 IDES	19
1 简介	19
2 IDES 的定义	20
2.1 有限 IDES 实现实例	22
3 经济压力驱动能源系统转变	23
3.1 工业与市场结构	23
3.2 未预料的外部事件	24

X 嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用

3.3 人口学	24
3.4 认知的变化	24
3.5 新知识	24
3.6 社会需求	25
4 IDES 在未来能源供给中的机遇	25
4.1 电网基础结构与稳定性的问题	25
4.2 高峰定价与实时电能市场	27
4.3 社会级别经济分析	27
4.4 可持续能源	28
4.5 可扩展性	28
4.6 波动性	28
4.7 成本与经济性	29
5 关键使能技术	30
5.1 对于智能小型分散式能源的管理	30
5.2 能源存储	30
5.3 能源预测	30
5.4 能源政策、立法与法规框架的革新	30
6 未来：虚拟电厂与工业	31
7 小结	31
参考文献	32

第3章 智能电器的建模设计

1 简介	33
2 抽象建模	34
2.1 对公寓或建筑物仿真	35
3 精化建模与应用场景	36
3.1 节点内建模与精化	36
3.2 WSN 建模与仿真	37
4 ESL 仿真	39
5 小结与展望	40
参考文献	41

第4章 建筑自动化所需的无线网络通信标准

1 简介	43
2 各协议标准概述	43
2.1 IEEE 802.15.4	43
2.2 ZigBee	44
2.3 6LoWPAN	44

2.4	无线 HART	44
2.5	ISA 100	45
2.6	WiMi	45
2.7	SimpliciTI	45
2.8	KNX	45
2.9	EnOcean	45
2.10	Dash7	45
2.11	WISA	46
2.12	ANT 和 ANT +	46
2.13	WiMax	46
2.14	ONE - NET	46
2.15	Z - Wave	46
2.16	Insteon	46
2.17	蓝牙	46
2.18	WiFi	47
2.19	NFC	47
2.20	RuBee	47
3	典型无线应用场景	47
3.1	低功耗传感器	47
4	工业应用	49
4.1	家庭与建筑自动化	49
4.2	数据传输速率	50
5	小结	51
	参考文献	52
第 5 章	智能嵌入式电器网络的安全	53
1	简介	53
2	智能嵌入式电器网络所面对的攻击	54
2.1	打补丁	56
2.2	无线暴露	56
3	密码学	57
3.1	MITM	60
3.2	密钥分发	61
3.3	安全过程	63
3.4	端到端加、解密	63
4	系统是如何被入侵的	64
4.1	针对具体实现的攻击	65
5	小结	66

参考文献	68
第 6 章 可供能源管理的嵌入式集成平台	69
1 简介	69
2 精细化能源管理的嵌入式网络平台	69
3 需求与方法	71
4 节点架构模型概述	72
5 EM 节点硬件架构	75
6 EM 节点内部的功耗管理	79
7 小结	81
参考文献	81
第 7 章 低功耗智能电器的供电	82
1 简介	82
2 电容性电源	82
2.1 限流电容 C_1 和稳压二极管 D_1 的功能与参数	83
2.2 R_1 的功能与参数	84
2.3 R_2 的功能与参数	87
2.4 整体效率与整体损耗	88
2.5 更换负载后的效率	93
3 电容性电源的集成电路方案	95
4 基础的降压变换器	95
5 改进的降压变换器	97
参考文献	100
第 8 章 智能电表的能耗测量技术	101
1 简介	101
1.1 能耗测量单元	101
1.2 通信接口	101
2 能耗测量算法	102
2.1 数学背景	102
2.1.1 非线性负载的电流消耗: ω_n 的测量	103
2.1.2 非线性负载的电流消耗: I_0 的测量	103
2.2 算法设计	103
2.2.1 量化细化	105
2.2.2 为所需的动态范围进行细化	106
2.3 ADC 的设计	106
2.3.1 通过参数缩放细化算法	110

2.3.2 对器件偏差进行算法细化	111
3 系统构架设计	115
3.1 PGA/缓冲器的设计	116
3.1.1 $\Sigma - \Delta$ ADC 的设计	118
4 小结	121
参考文献	122

第 1 章 使电网可靠工作的 DRM

Holger Hermanns 和 Holger Wiechmann

1 简介

欧洲的电力系统正在发生飞快的变化。这是大量部署小型和中型的可再生能源发电设备所带来的直接结果，再加上影响可再生能源的光照强度和风速不可控这一事实。这些促使人们寻求一些新颖的方法来控制和管理电力系统网络，其核心目标是连续地匹配整个电网的发电量和用电量。如果不匹配，就会影响到供电的频率，这种频率偏移事实上是承担了生产与消费不平衡的缓冲作用。

这种平衡是由电力生产商根据周期性（每周、每天、每小时、每 15min）对用电量的预测来进行维护的。供电量和用电量的实时匹配由专门的电厂和控制回路，连续地监控并将频率稳定在 50Hz（在欧洲）这样的途径来完成。这种机制可以缓冲相当于峰值用电量的 10% 的抖动。

不过这种相沿成习的做法依赖于两个假设：电量生产是确定性的；是可控的过程。这两个假设在未来将不再成立，下面会进行解释。这会带来一个挑战性的控制难题，也就是说当发电和用电双方出现随机行为时要保持发电量和用电量紧密绑定。广义上来讲，目前欧洲主要电力供应商的焦点是想办法让用电量更加可控，以便让用户来缓冲发电量上不可控的抖动。为此创造出了需求—响应（Demand – Response, DR）管理 DRM 的概念。DR 系统旨在能够根据电网的总体和局部状态信息暂时减少或增加用电量。本章就问题领域进行介绍，并且纵览各种基于 IT 技术的方案来最终解决这一挑战。方案聚焦于分散式的 DR 控制方法以及它们的稳定性。本章先会细数各种技术的约束以及功能，接着会讨论一系列的分散式控制方法，它们采用并组合了日常使用的因特网与 LAN 协议中的理念。从可靠性、吞吐量和公平性方面来探查这些方法，结果是这种由因特网产生的打破同步的机制，尤其是引入随机化的方法成为整个解决方案能站得住脚的关键一环。

本章组织结构如下：在第 2 节概略地描述一下欧洲的电力市场；第 3 节通过几个具体的观察和预测，提出了终端用户在 DRM 策略中的角色；第 4 节对分散式 DRM 方法进行深入讨论，重点关注电网的稳定性以及从因特网中学到的经验；第 5 节对本章进行小结。

2 电力市场的考量

首先解释一下能源生产和能源市场的基本原理^[1]，这对于理解后续内容中所讨论的问题是一些必要的准备。

2.1 原理

电力网络管理有两种从根本上相异的原理：

1) 生产遵循消费：该原理所基于的假定是，电力需求从来不会超过供给能力以及电力生产这一方是可控的。因此，在用户侧很少会有什么规定，而电力生产方则经过组织和协调以便可以根据需要来适应电网的波动。消费者只需根据他们消耗的电能来付费。该原理在欧洲及很多发达国家都普遍盛行。

2) 消费遵循生产：这种模型假定只有当电力供得上的时候才能用电。电力生产这一方几乎是不可控的，电力供应在用户侧呈现出经常性的中断，通常需要为用户分配用电限额。为了实现配额，有一些机制来控制用户的用电情况，基本上都是对某些用户设备合闸或断电。这一原理在发展中国家经常会看到。

第一种原理很明显有利于用户在方便性上的直观体验。为了理解它是如何工作的，重点关注德国的情形来详细讨论一下。德国目前分为4个所谓的控制区，在一个控制区内供应商和电网用户组成了所谓的会计网络，生产者和消费者在此范围内记账。每个消费和生产单位都归属到一个单一的会计网络。传统上，每个会计网络都体现了物理的连接和相邻关系，但由于市场管制的放松，这不是严格必需的。因此会计网络在电网上形成虚拟结构，每个网络都有一个协调员来跟供应商和用户接口。电网协调员的主要职责是以15min间隔为单位，保持会计网络内部的流量平衡，所出现的偏差需要在设定的时间内进行纠正。会计网络之间通过物理实体（电缆、变压器）交织在一起。

跨会计网络的电力传输是建立在每日的负荷调度的基础上，每个会计网络的协调员必须向主干网络管理机构预先通报（在每天下午2:30之前通报下一天的情况）。除非是一些处于瓶颈状态的数据，时间可以有45min的宽限。实际上，就意味着网络协调员需要对本会计网络内的用电需求总和进行预测。为了得到平衡，协调员必须把消费量与生产能力（市场的购买量或者电厂的发电量）进行匹配，在同样的时间基线内进行调度。

对于稳定和可靠的电网运营来说，保持生产和消费的平衡是必要的需求。电力的过量供应（或消费不足）会引起频率的上升，而供应不足则会导致频率下降。过度的频率偏差会在生产及消费双方产生功能异常，这可能会进一步诱发连锁反应而最终导致断电，即电网崩溃。

为了保持短期平衡，网络协调员（或其他的网络合作方）使用一种叫做

“控制能量”的概念，这的确是一种决定性的概念。控制能量是一种电力，它可以通过网络控制器几乎是瞬时的添加给电网或从电网中抽去。在技术实现上它通常是借助于抽水蓄能电厂，减法的结果是用电力将水抽到高处，加法的作用是反向的，将水泄下以产生电能。在整个德国，控制能量的总量约为 7.4GW。与 2008 年的 75GW 的峰值电力消耗相比，这意味着基于能量的平衡控制可以抵消约 10% 的波动。控制能量还可以跨电网交易，对于维护电网的稳定，这种市场机制还是很典型的。但由于抽水蓄能技术的效率不高，这一方法还是会带来相当大的能量损失的。

2.2 挑战

在欧洲电力市场，把可再生能源集成到电网中是一个巨大的挑战。随着可再生能源的比重增长，电网的不稳定性也跟着增加。可再生能源生产的不稳定性严重高于传统的电力生产方式，抛开别的不说，单就这一点就意味着在电网稳定性方面需要更多的精力投入。如果不采取任何手段，剧烈增加的波动将会在某点突破可用的控制能量，后果就是未来会产生一种之前无法想象的现象，醒目地形容一下：“德国的太阳能多发了一些电却把葡萄牙的电灯都给弄灭了”。

这种稳定性的威胁跟 2007 年 11 月 4 号欧洲大部分地区的停电很相似，是由人工关闭德国北部的一条陆上通信线路引起的。尽管这次大停电是由人为失误引起的，但还是要为由不可控因素导致的类似的效应做好准备：在阳光明媚的 2010 年 9 月 6 号，过量的光伏电力注入德国的电网，比前一天所预报的数量急剧增加，在午餐时间，有超过 7GW 的过剩电量需要被平衡掉，这耗光了全部可用的控制能量（-4.3GW）。只有通过向邻国进口紧急储备（-2.8GW），也就是说向他们出口过剩的电力，才有可能避免大停电。这一事件，再加上 2012 年的一次相反的事件，使得相关原理的研究人员充分认识到了问题的存在。那些基本上维持了几十年的市场规则，现如今正以越来越快的速度被修订和改编^[2]。

除了电网的稳定性，快速增长但相当不稳定的可再生能源也对能源经济造成影响。电力生产增加的不稳定性意味着在短期电力市场的定价方面也会带来不稳定性。另外它还开始对传统的热力发电厂的负载特性产生了严重的影响。

具体来说，负载的特征在发生变化。负载特征可以用函数来表示实时的能量（W），指示出在每个时间点上的电力消耗量或生产量。到目前为止，（预计的或实际的）电力消耗量一直是在可再生能源的生产量之上。两者之间的空当由传统的方法来填补，通常这被称为剩余热力负荷。可再生能源的比例目前还比较小，并且总用电量也比较好预计，剩余热力负荷还是可以相对容易准确估计的，因此还是可以做到连续匹配的。现有的发电厂所用的技术要求是高效生产电力，并不需要很灵活：像河流、原子能，或者燃煤发电厂这些基础电力，它们被赋予的特征是边际成本低，且适合全天候运行。这种舒适的状况在未来会有所改变。

人们将会看到，首先会在一年中偶然的几个小时里，然后是越来越频繁的，可再生能源的生产总量会高于当时的总用电量（参见图 1.1）。这会带来两个基本的问题：①当可再生能源生产量高于总用电量时，会发生什么事情？②从更长期的角度来说，一旦整个基础用电需求都可以被可再生能源支撑的话，人们还需要什么样的发电实体呢？

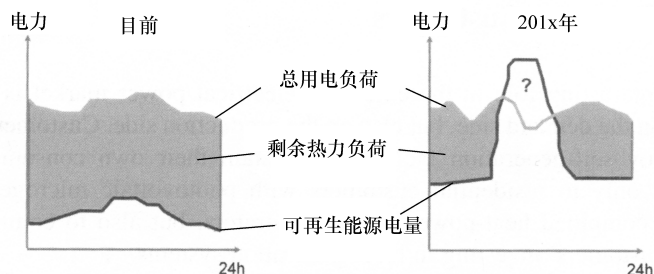


图 1.1 预计剩余热力负荷的负载特征变化^[1]

概念上来讲，应对不稳定性的增加，一个明显的策略是相应地增加控制能量的容量。然而这种传统的机制还是有诸多限制的，不单是因为这种抽水蓄能对地理环境的依赖（蓄水库），经济原因也会阻止这种方法在任意地点复制。将来为了可靠地平衡不稳定性，把所有的努力都仅依赖于电力生产一方（煤炭、天然气和抽水蓄能电厂），看起来实在是过于苛求了。

经济的和生态学的原因所产生的后果是导致从原理 1——生产遵循消费，而转向原理 2——消费遵循生产。理由很简单，光伏和风力发电厂一旦装机完成，电力生产的边际成本为零，那这些电量最好是立即消费掉。这意味着传统的电力分配机制一定要立足于不同的概念基础。如果想要避免剧烈增加的调控费用，电力消费必须要更加可控，以便根据当前的生产量进行匹配。在未来的几十年，我们因此会看到生产者和消费者更加紧密的集成与协作，这其中由网络协调员起到中枢作用。这对于保障整个欧洲电网高标准的可靠性与稳定性是必不可少的，是“智能电网”这一愿景背后的驱动力。这一愿景有两个重要因素：首先它需要巨大的基础设施投资，不只是在用户那一端，尤其要在电网的内部，需要把它建设得更加灵活和具有适应性。其次，还有相当多的隐私问题需要考虑，因为为数巨大的精确的用户数据需要集中收集（例如收集到网络协调员那里），这些数据可能会轻易的被不正当使用在剖析用户行为上面。这两个问题的阻碍很大，使得电网的管理层得设法使用别的途径，用户数据不再集中收集，电网也没有在本质上更“智能”，而是在用户侧使用非集中的、分布式控制算法，基于它们手边就有的数据。

3 用户的新角色

在新兴的电力市场中，顾客的角色是最有意思的，他们不仅是需求方，还是生产方。顾客越来越多地采用一些设备自行发电以供自己所需。他们不仅包括使用光伏微型发电机或小型的混合热电联产（Combined Heat – Power, CHP）的居民，还包括商业与工业顾客，他们投资建本地的发电系统。

这些发展带来了两个有些交织在一起的后果：

- 对于传统的大规模电力的生产商，售电量预期会收缩，同样的事情也会发生在传统的集中式发电的可再生能源电力市场。这给生产商在电网管理方面的影响力带来了冲击。到目前为止，交流电的频率在很大程度上由传统的发电厂大型回转质量来保持，旋转频率同步在 50Hz。

- 顾客自然的会尽量多地使用他们自己发的电。举例来说对于住宅顾客，他们会安装需求侧管理系统，外加电池蓄能，对于商业和工业顾客，可以预料他们也会使用同样的方法。这将意味着大规模发电厂的总发电量会进一步下降。

对于安装了发电设备的顾客以及传统的顾客，如果决定以更灵活的方式来管理他们的用电需求，根据市场情况来调整用电量，他们都会从中受益。他们可以决定调整那些小型的 CHP 设备和热泵的行为，或者是电动车的充电行为以适应当前的供电水平。这预期会将目前的市场划分——工业顾客（B2B）和标准顾客（B2C）——转而划分为有意愿和能力调整他们用电量的“智能”顾客以及遵循传统消费模型的静态顾客。再过几年，B2B 与 B2C 的区别可能将会消失，而被事件驱动的 DR 机制替换掉。这种机制可以在电网出现紧急情况时触发，也可以由市场行为触发（例如对终端用户的定价策略）。通过 DR，负载临时的增加或减少，相应的顾客服务水平可能降低也可能不降低。促使顾客加入这一计划的原因通常是经济方面的。月费或事件相关的回报等可以让顾客接受 DR 机制来干预他们生活。另外，经过精心设计的 DR 概念对于电网的稳定性也是有帮助的：安装在终端用户侧的装置可以通过本地的电源插座获取电网状态的直接指标参数，以便在电网出现紧急情况时做出反应。这样就以分散的方式隐性地增加了控制能量总量。我们将在第 4 节来细致地讨论这一方法和它的实现。

3.1 用户分类

为了理解 DR 所运行的背景环境，重要的做法是把时间轴划分为片段，评估每一个时间片段电力消耗的变化情况。对于 DR 策略的开发，恰当地分类是先决条件。如前面所提到的，电力生产者从发电这一角度可被分类为确定的、可控的，或者是随机的、不可控的两类。一个燃气发电厂是确定的，而一个风力发电厂却不是，它表现出随机的特征。同样在用户侧，可以根据如下特征来区分用户

类型：熨衣服、使用个人计算机（PC）、看电视等这些事情的用电具有随机的特性；而另外一些用电类型却不是，它们是确定的，或者最好具有确定性，在这一分类中，常见的有电热水器、电暖气、空调器和风压设备等，具体来说，这些用电器的正确运转就是在一定限度内不随着时间变化，这会使它们对未来先进的控制应用很具有吸引力。非高峰时段的蓄热式采暖就是用户侧确定性控制的一个例子，按照一个固定的时间表，蓄热加热器把基础发电站夜间过剩的发电量转换为有用的热能。第三类用户由一些可充电、放电的设备构成，举例来说电动或混合动力汽车就属于这一类，可以预期在将来这一类的设备在数量上会有相当大的增长。

后两类用户很有希望作为着力点通过 DR 策略彻底地平衡掉电力生产的波动。可以把他们总结为弹性的或部分弹性的用户，如图 1.2 所示^[3]。到目前为止，德国这类用户的用电总量在几十吉瓦这一数量级。

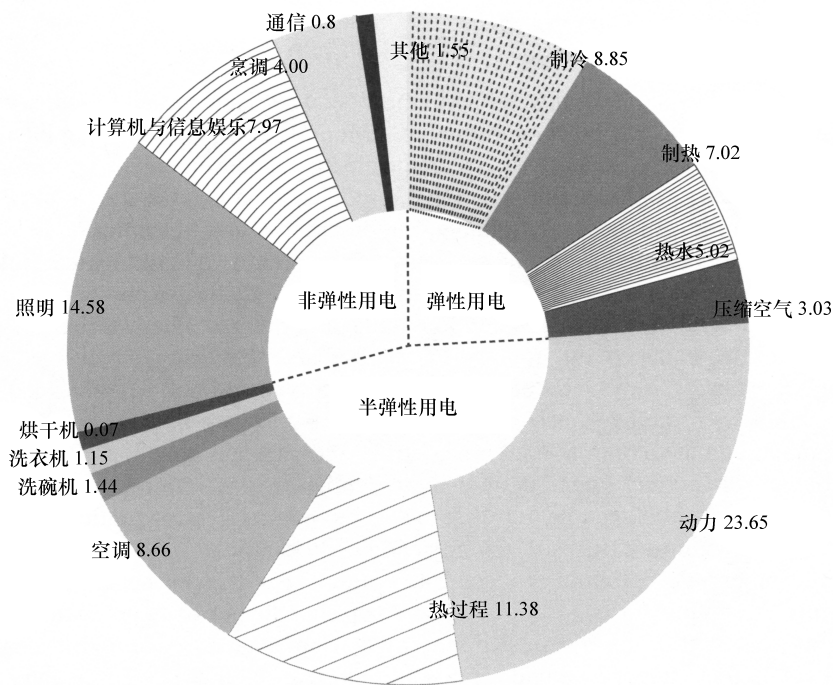


图 1.2 用电设备的分类以及它们对于 DRM 的潜力^[3] [该分类是基于 2005 年的关于德国全年总用电量的数据（537TWh），除了交通相关的用电。大约 24% 的用电可归为弹性的，另外有 47% 是部分弹性的]

SmartCoDe 项目^[4]开发了更加细致的分类方法来为家用和办公领域的用电户进行分类。电器分组的根据包括它们的服务类别、它们的界面以及它们在能源管理方面提供的手段。图 1.3 引自 SmartCoDe 项目，对这些分类进行了概述。例如“虚拟可存储服务”这一类包括了那些可以作为虚拟存储设备的电器，这一类中最有代表性的有冰箱和电热器。如果电费较低或发电量充足，这些电器则开始制冷或者加热，比平时所需的再多一些。这样在电费高的时段它们可以保持长一些的时间不开机而仍能提供可接受的服务。另一个重要的分类是“可调度的服务”，这类中的一个例子是洗衣机，它们可以被调度在电费低的时段运行，只要它们的主人在把衣服放进洗衣机里的时候指示设备可以这么做。

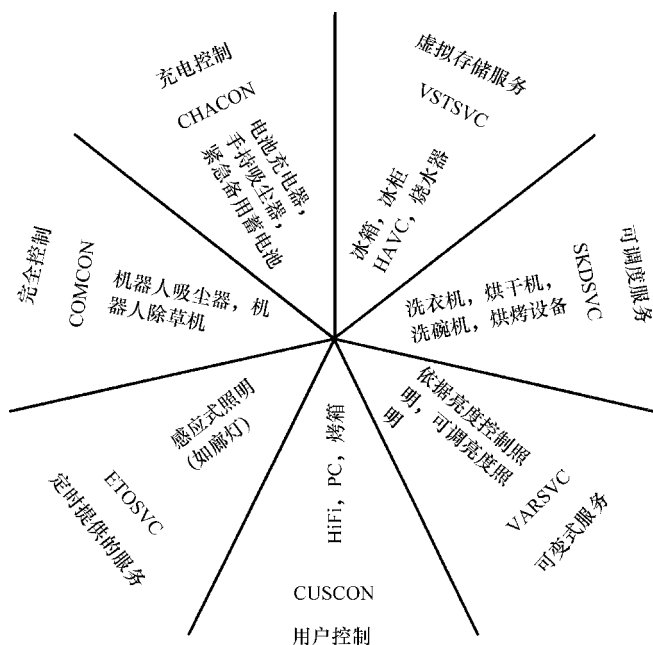


图 1.3 由 SmartCoDe 项目开发的用电设备分类方法^[4]

3.2 DRM 活动

该采取什么行动来对潜在的 DRM 进行开拓呢？答案比较简单^[5]：通过精心地组织那些弹性用电单元，就有可能在时间轴上交换负载（见图 1.4），以用来对抗那些前面所述的关系到电网稳定以及可靠供电的负面效应。一个本地的能源管理单元可被看作整个电网的一个接口，它收集全局的和本地的数据，计算出具体的指示给每个用电器（见图 1.5）。当日的或者定点的市场电价可被用作生产与消费趋势的全局指标，本地指标则有：频率与电压的观测数据、本地生产与消费单元的配置参数以及顾客的需求。这种控制单元一旦推出，他们就可以在终端

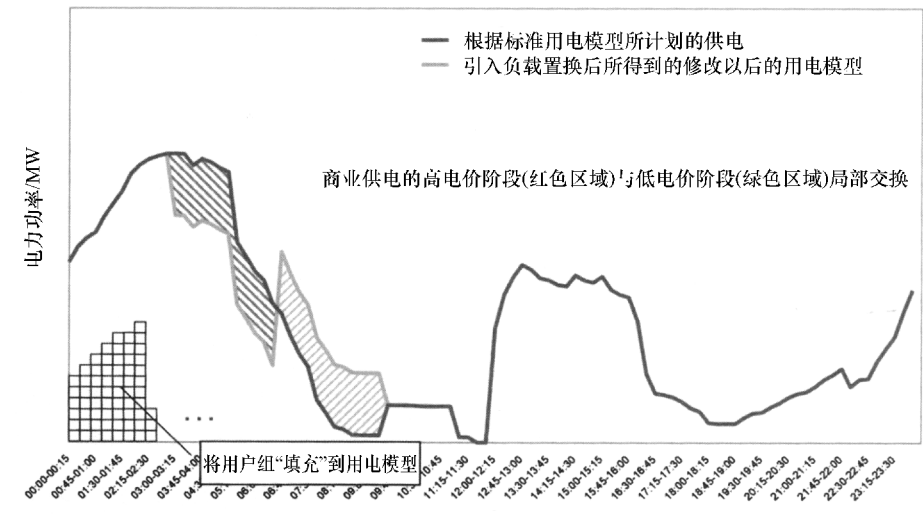


图 1.4 负载置换原理图^[5]

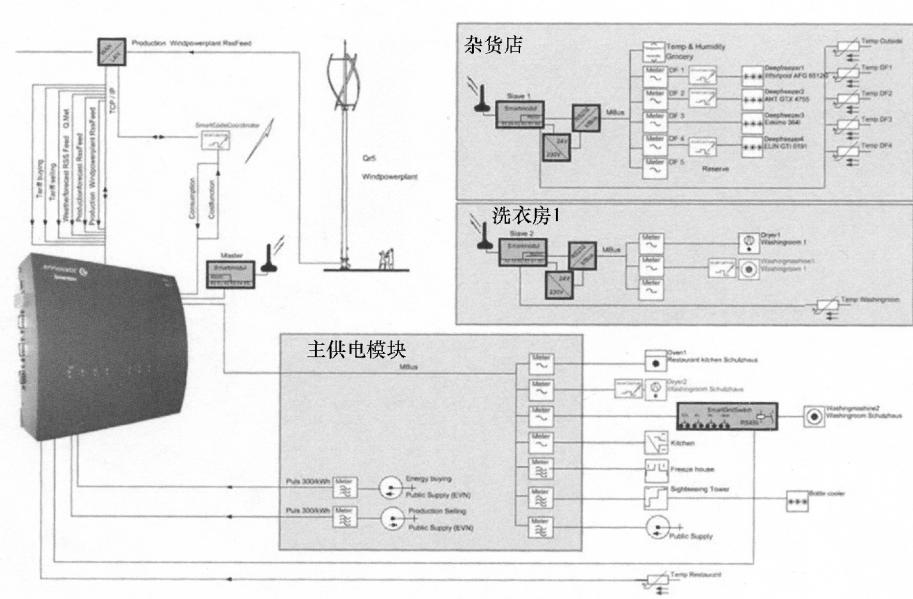


图 1.5 SmartCoDe 的项目演示集成了 ennovatis 有限公司的能源管理盒

用户侧分散式地做出决策。当生产过剩时，成组的弹性（或部分弹性）用电器被控制开机，以便有目的地增加消费，接着在指定的时间期限内，当遇到生产不足时这些超额消费会通过对指定设备组关机的方式来被平衡掉。如果这种组织编排再进一步由一个中央实体来协调的话，这就会形成虚拟发电厂的概念，将在本

书的后续内容中有述^[6]。DR 概念的具体实施有赖于电网状态的实时信息，弹性的用电单元，连同计划时间表以及短期的纠正偏差的选项，像控制按钮一样，可以是分散管理式的，或者是从远端发起，例如网络协调员。

3.3 电网的经济性与电网的稳定性

能源市场同时也是一个受管制的市场，这样做是有充分的理由的。因为电力生产所发生的变化，这些规则在稳定了几十年之后正在以越来越快的速度进行调整，只有少数几个原理（在发达国家）保持不变。电力传输网络是按分层结构组织的，长途高压（380kV）线路为顶层，向下最末端一直连接到居民家里和商业顾客那里，工作在 400V 三相（或者每相 230V）。根据欧洲的立法，电网的运行被分为以下两种运行主模型：

- 紧急运行模式，在这种情况下，需要网络协调员的直接干预，还有可能对顾客的服务水平带来影响。

- 正常运行模式，各方的行为决定只受市场情况激励。

既然对于各相关方来说电网的稳定运行是至关重要的，就需要检测和避免瓶颈与紧急情况。电网可能会在以下三个维度上变得不稳定：

- 频率：在欧洲，目标频率是 50Hz，如果频率超出了 49.8 ~ 50.2Hz 的范围，这会是全欧洲的严重问题。

- 电压：在终端用户那里，尤其是在线性导线束连接的情况下，下游用户会因为上游的生产与消费的波动而经历相当大的电压波动，偏移超过 10% 就无法忍受了。

- 容量：输电线路的容量是有特殊限制的，以负载功率来衡量，即电压乘以电流。容量可能会成为严重的瓶颈，尤其是在涉及无功电流的情况下。输电线路通过熔丝或自动继电器限制负载来进行保护，以免过热或产生意外事故。单个的这类保护装置跳闸，可能会引发连锁反应，带来像 2003 年北美（8 月 14 号）和伦敦（8 月 28 号）那样的大面积断电。

3.4 DR 系统的基础功能构成

既然电网的稳定性是优先要考虑的事情，在设计 DR 系统时则应从系统运行的方面重点考虑。实现 DRM 所需的基础功能如下：

- 小范围和中等范围的技术来预测

- 光伏和风力发电量，

- 电力需求，

- 电网现容量和潜在的瓶颈，

- 电网使用率和网内电流，

- 电压稳定性，尤其是最后一英里；

- 用于测量与记录电流值和电网组件状态的基础架构，包括财务工作所需的精确的信息；

- 把弹性顾客组织成集群并协调他们行为的技术；
- 实现 DR 机制的决策支持系统。

决策支持可被证明是最复杂的然而又是解决方案的最关键一环，其他环节都是现有技术的各种演变。决策支持是将电网转变为“智能电网”所期望的技术。这是一种待开发的全新科技，它的进程正落后于欧洲一些地区尤其是德国所发生的快速变化。

3.5 具体案例：德国

电力市场变化速度最快的国家之一就是德国，主要归因于大量增长的风力和太阳能发电。这是过去几十年来联邦立法所强化的法律体系所带来的结果。它具备以下特质：

- 财政激励使得发电、并网以及在需要的情况下回购电力的行为都是可获利的。
- 除非是在紧急情况，电网必须优先吸纳小产量的电力。既然这样，如果这种电力被浪费掉了也需要记账，就像它们已经供应给电网一样。
- 德国政府在日本福岛事故之后决定撤掉核电站。

正是由于这些原因，光伏（PV）微型发电设备在全国各地终端用户的屋顶上大量的使用，到 2009 年年底，光伏发电总量已达 10GW。尽管当时联邦政府决定减少财政刺激并且将目标增长率设为每年 1.5GW，到 2011 年年底还是增长到了 25GW，而原计划的目标仅为 13GW^[2]。

这种增长带来了问题，尤其是在基于风力和沼气的微型发电设备大量增加的地区。德国北部能源供应商 EWE AG 最近的报告指出，需要人工干预的紧急情况的次数已从 2009 年的每星期少于一次增加到 2011 年的大约每天一次^[7]。

3.6 管理最后一英里

最后一英里的管理是一项独特的挑战。电网客户端通常都包含线性导线束供顾客（私家用户或者小型商业用户）连接。有如下三种理由说明它们是如何难以管理的：

- 为数众多的终端用户网络呼唤着高度本地化和高度自动化的网络管理。
- 还没有测量与上报的基础架构来支持对电网各参与方的精确、及时的信息收集。这加强了对高度分散化的网络管理的需求。
- 有很大一部分光伏发电设备都是安装在民居屋顶的，它们因此属于最后一英里连接。光伏生产的波动性需要高度灵活的网络管理。

4 分散式网络管理

最后一英里问题需要设计一种高度本地化、高度自动化、高度分散化和高度

灵活的网络管理，这是相当具有挑战性的。它类似于自稳定系统（Self-Stabilizing System, SSS）设计领域——一种分布式计算学科^[8]。在这一学科中，SSS由一些遵循同样的算法模式的均匀的系统来构建，目的是它们联合运行起来能够产生稳定的整体行为，并且可以经受短暂的扰动而自我恢复。然而与SSS通常所考虑的设置相比，电网管理还是有一些重要的区别：在电网中，不稳定的威胁必须在严格限定的时间内解决掉，这一点在SSS中是不保证的。另一方面，在SSS中，可以认为各参与方都不知晓系统的全局状态，而在电网中，各参与方原则上是可以获取本地信息的——电流、电压和频率。尤其是电压值，它对于反映本地电网状态是很好的指标。

4.1 与因特网的相似性

另一种高度分散式的高度灵活的以及高度自动化管理的系统就是因特网。在因特网设计之初，因特网先锋们所提出的一些原则对于未来的需求侧管理也同样有效：

- 网络的中立性和公平性：网络在各用户间共享它的容量方面是不区分对待的。理想情况，公平性体现在如果有 n 个用户共享一个连接，平均起来每个用户都可以使用 $1/n$ 的容量。
- 边缘智能，核心哑（dumb core）：把智能加诸于网络本身的成本效益远远低于把它加在网络边缘，例如终端用户设备。
- 分布式设计和分散式控制：分布式的分散控制不仅是保障稳定性的方法，它还是保护用户隐私的主要原则，如果中央集权出于决策目的而收集信息，用户隐私就会置于危险之中。

因特网与电力网络还是有很多相似之处的，包括巨大的规模、层级的结构、有机增长和极高的可靠性。事实上，有很多好的理由主张电网的管理应该从因特网的管理大量吸取灵感。现今流行的做法，使用因特网基础架构以多少有些集中的统一协调的方式来管理电网，可以非常明显地感受到上述主张。

而这里要讨论的内容是，从因特网的设计中获得灵感来研究未来电网的DR策略。“公平性”会被解释为在电网的正常生产的时候公平的共享网络容量（“每个人都有权公平地输送电力到电网”），而在电网紧急情况来共担困难（“每个人都可能受些罪”）。这一想法初看起来有点儿吓人，但下面会论述到目前的集中式的电网管理策略太短视了，不会流行太久。必须找到新的分散式管理的策略，并且最好能超出目前的电气工程的视野范围。

4.2 粗劣的分散式决策模型所产生的效果

为描述该问题，细致地研究一下德国的情况，目前已有并网的光伏微发电设备有75%都未加测控而且是无法远程控制的。从2007年起，出台了一项规定（EN50438:2007）来实施基于频率值的分布式控制策略。按照规定，一旦发现频率观测值超过50.2Hz，微型发电设备必须停机。该规定的本意是通过消减过

量生产来稳定电网，可后来浮出水面的事实是因为光伏发电的数量巨大，四处分散的决策几乎同时生效，这跟产生于中央控制的决策效果相当：一部分非常可观的电力被撤掉，会使得频率值突然下降，紧跟着光伏设备又重新加入发电，依此类推。由此引发了严重的频率振荡。

对这种效应进行简化的模拟如图 1.6 所示，在背景频率上面叠加一组光伏微发电设备的效果^[9]。由目前发生的这种频率振荡问题而引发，人们正在研究新的分布式控制策略，尤其是 VDE，德国电气电子与信息科学协会^[10]。基于他们

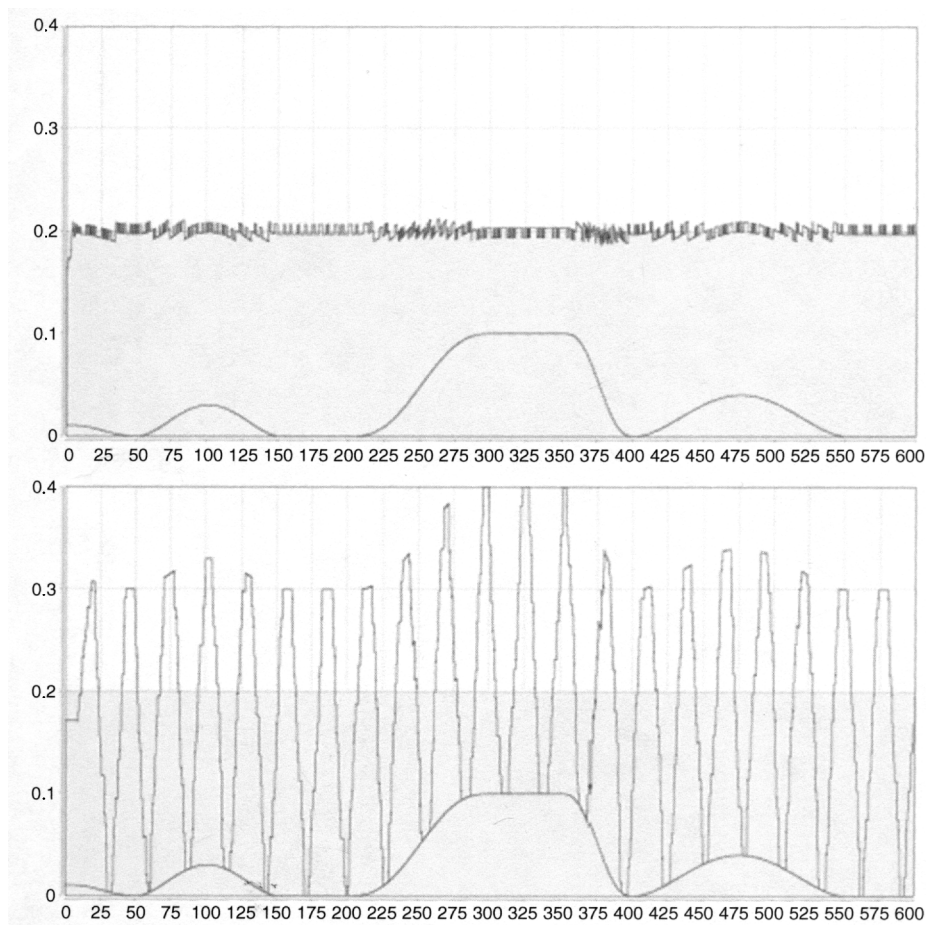


图 1.6 德国光伏微发电设备集合在 50.2Hz 开关控制器下的行为模拟^[9] [德国的立法规定，当频率超过 50.2Hz 时每个光伏微发电设备都需要停止发电。在上边的图中可以看到频率值在允许的最大值附近有非常微小的振荡，不管背景频率（底部的曲线）是怎么变化的。这种情况是当所有的参与者个体都能对观测结果立即生成决策的情况下发生的。而下边的图则显示了剧烈的振荡，它在现实中确实发生，原因是观测时延]

的研究，可视化的效果如图 1.7 所示，用的是同样的一组参数。这种控制器的改进很明显：频率振荡和跳变完全不见了，只有随着背景负载而发生的变化。虽然这种控制器在避免频率振荡方面表现出色，它却无法将频率保持在 50.2Hz 的安全区域内。不过这种直接的安全频率控制很可能不是这个控制器的设计目的，实际上这种线性控制器与中央集权的维护电网稳定的控制举措不相抵触。

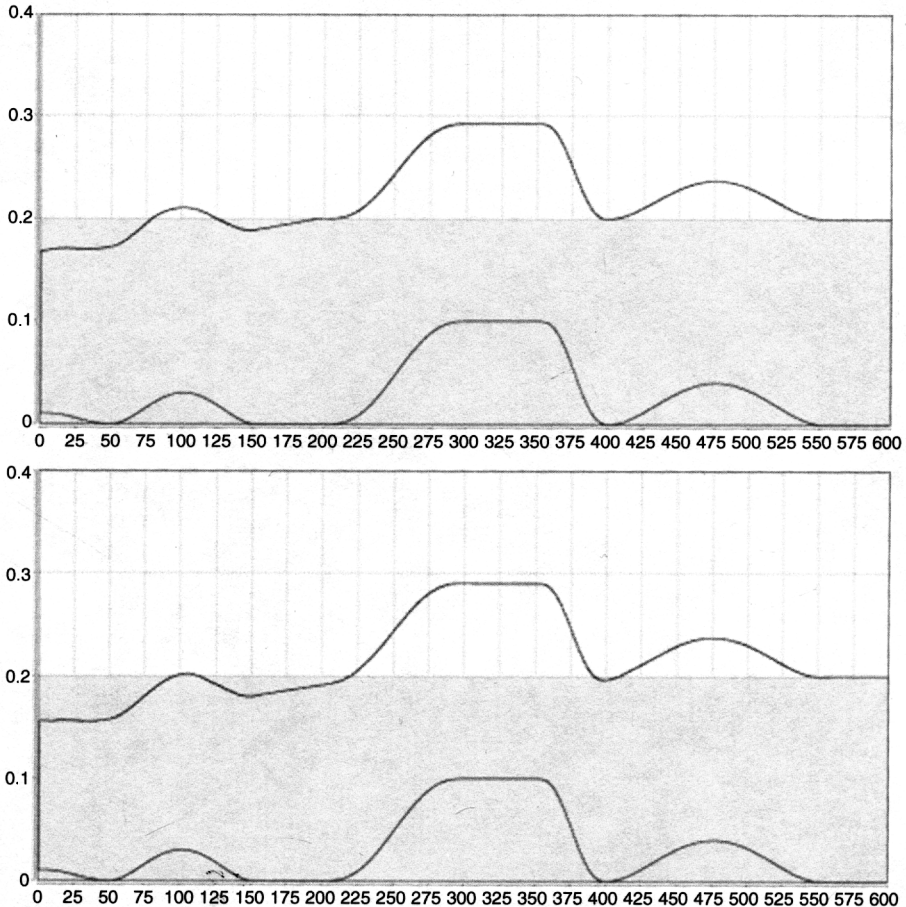


图 1.7 VDE-AR-N 4105^[9]的线性控制器的行为 [为应对振荡问题，VDE 目前正在开发新的规则。只要观测到的频率低于 50.2Hz，发电设备会最多把发电量提高它的总发电能力的 10%（每分钟）。一旦观测到的频率穿过 50.2Hz 的标志线，发电机当前的发电量会被记录下来，并按每赫兹 40% 的量线性减少。在观测到的频率值超过 51.5Hz 的情况下，发电机必须立即停机，然后只有在观测到的频率低于 50.05Hz 超过 1min 之后才可以恢复发电。这种控制器完全没有呈现出振荡或频率跳变，而是随着背景负载来变化。在上面的图中可以看到在反应及时的情况下，全体发电机对背景频率的影响，下面的图则画出了响应时延带来的影响]

4.3 学习因特网的概念

下面汇报一组仿真研究结果^[9]，它们是应用了受因特网的概念启发而开发的非集中的、分布式的控制算法。首先，是传输控制协议（Transmission Control Protocol, TCP）所应用的概念，用于在若干连接（在这里的情况中对应于发电设备）的有限带宽中（对应于电网接纳电力生产的容量）实现公平的共享：带宽使用率以固定的步长（加性）增长，如果出现拥塞，就按 $2/3$ 的比例降低带宽。这种加性增长、乘法性降低（Additive - Increase, Multiplicative - Decrease, AIMD）的策略，确保同一连接的各个用户最终的带宽使用收敛到平均值。这种控制器改善了基于开关控制的控制器，如图 1.8 所证明的那样，频率波形图是开

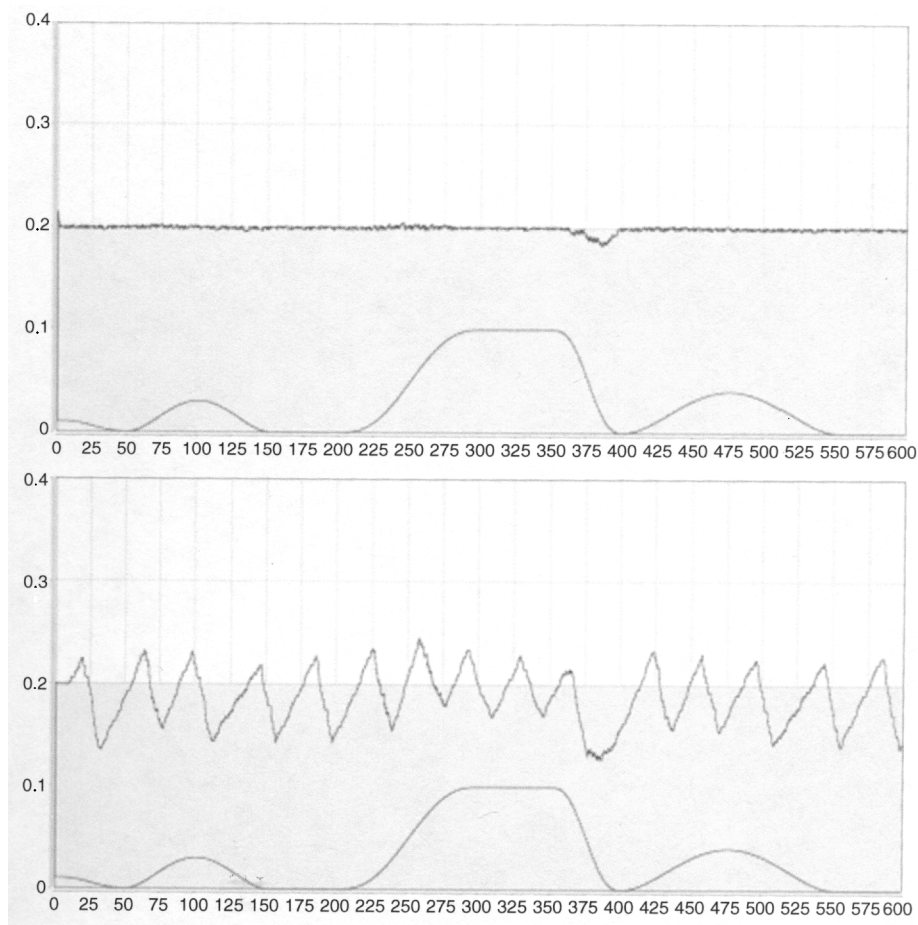


图 1.8 应用 AIMD 策略的控制器行为^[9] [这是一种虚拟控制器，受启发于因特网的 TCP 在若干连接（在这里的情况中对应于发电设备）的有限带宽中（对应于电网接纳电力生产的容量）实现公平的共享；带宽使用率以固定的步长（加性）增长，如果出现拥塞，就按一定的乘法比例降低带宽。频率仿真的结果呈现为开关控制器的行为被高度抑制的版本]

关控制器的行为被高度抑制的版本。与 VDE 提出的控制器不同,这种控制器的行为会设法积极地对频率变化施加正面影响,不过还是会有一些不规则的振荡。AIMD 控制器令人感兴趣的点不是它在稳定性方面有多少改进,而是它是否给分布式的电力生产也带来了像 TCP 给计算机网络所带来的同样的公平性。

在考虑之内的另一种控制器使用了随机化的概念,是通信协议中的一种标准概念,用以打破对称性与同步性的问题。这种控制器使用两个骰子(随机生成器),其中一个用于决定控制器要不要向电网输入电力,骰子每一面的数值与观测到的频率相关,以便在观测到频率下降时提高电力生产的概率。另一个骰子用于决定在此前已经发现频率太高的情况下,控制器何时再试着往电网增加电力。同样,骰子各面的数值是基于观测到的频率,具体来说,与观测到的连续的频率过载次数呈指数关系。图 1.9 显示了在设置延时的情况下频率变化在幅度上与

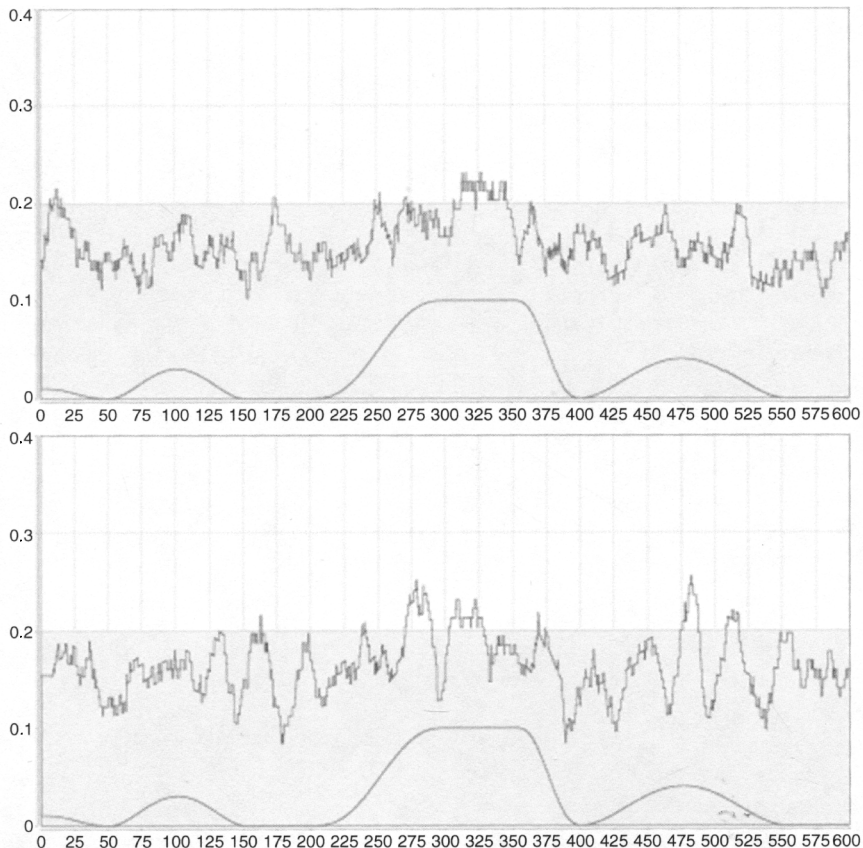


图 1.9 使用指数补偿的频率相关控制器的行为^[9] [这种控制器基于概率决定是否向电网输送电力,概率值是观测到的频率的函数,在 50.0Hz 时值为 100%,在 50.2Hz 时值为 50%,在 50.4Hz 时值为 0%。进一步,当频率超过允许值(50.2Hz)时,控制器会等待一个随机选择的时间跨度,再去尝试测量进而开机发电。所选择的时间跨度随着观测的频率超过 50.2Hz 的次数按指数级增加,该方法受启发于 CSMA/CD 媒体接入通信协议的指数补偿原理]

AIMD 控制器接近, 但更加不规则一些。这说明如果选择使用合适数量的、采用足够随机策略的概率控制器, 的确可以实现精细的、确定性的控制。

4.4 可用性、有效带宽与公平性

为进一步权衡, 对不同的控制器的行为进行了深入的研究^[9]。先来看它们的可用性, 即系统在低于 50.2Hz 门限的安全状态的时间比重。其结果与有效带宽相关联, 即每个发电器的“有用电量”的平均值。鉴于过高的频率最终会带来不稳定的结果, 如果系统在非可用的状态 (就是说频率超过 50.2Hz), 生产的电力也被认为是没有用的。

图 1.10 对各控制器的可用性与有效带宽进行对比, 其中有四个我们已经在前面讨论过。VDE - ARN 4105 所提出的线性控制器很明显是个离群值, 在可用性方面有负面效果, 然而就像之前观察到的那样, 它的目标很可能并不是为了有效地稳定系统, 而是为了避免引入额外的不稳定性, 在这一点上通过观察认为它还是很成功的。在图 1.10 中两个正向的离群值是 AIMD 和带指数补偿的频率相关控制器。相比其他控制器它们都设法提高可用性以及有效带宽, AIMD 控制器对有效带宽的效果更大一些, 带指数补偿的频率相关控制器在稍低的有效带宽下提供了更高的可用性, 例如会剧烈地冲过 50.2Hz 的不安全区域但是时间更短。

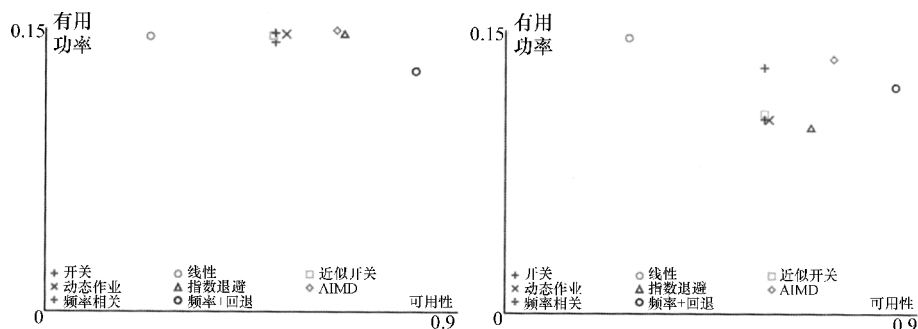


图 1.10 可用性与有效带宽的关系 (左图为立即反应, 右图为延迟反应)^[9]

另外还研究了各控制器的公平性以便找出它们其中是否有一些发电器会比其他的明显多提供电量^[9]。可以发现, 很明显 VDE 控制器在这里公平性最差, 这并不意外: 它在发电量上不会激烈变化而是试图小步调整。原本有很大输出的发电器最后差不多也仍然是高输出, 而开始就很低或者关机的发电器很少会得到机会来大幅增加它们的产量。除此之外这种控制器没有机制去避免频率超过 50.2Hz, 因此一个高输出的发电器最终会导致不安全的系统状态却不被处罚。令人意外的是在延迟设置的情况下 AIMD 控制器是各控制器中公平性最差的。

4.5 探讨

以上的种种考虑都是集中在电网状态的单一指标, 即频率, 并且假定光伏发

电对其有线性影响。对线性的假定是考虑物理实际而间接得出的。本来还可以用观测到的电压而不是频率来作为参考量。对低压交流电来说, 允许的电压范围是 360 ~ 440V。在这个基础上对线性的假设可以工作并且分析结果^[9]可以因此直接应用。值得注意的是, 频率漂移通常会影响到整个欧洲的电网而不仅仅是最后一英里。这还表明单纯的最后一英里对频率的影响事实上是可以忽略的, 只是在这里的研究中被放大了。作为对比, 电压的变化是局部现象, 与最后一英里频率漂移问题纠缠在一起。因此在最后一英里的观测电压方面, 单个微型发电器的影响还是很大的, 但事实上可能会被空间的属性扭曲。以上探讨集中在电网的可靠性而不是经济性。可靠性是配电网需要高优先级考虑的事情, 因为不管是否是可再生的能源, 为了经济地使用能源前提要求是可靠的电力传输。当然, 在电网工作状态正常的时间段(希望电网总是以此状态为主), 除了频率和电压, 同样的控制算法还可以使用即时定点的市场价作为电网指标。这些指标在现代借助于因特网是很容易得到的(指电网可靠性问题, 假如有相关权力部门运营因特网连接的话), 并且可被用于分布式的 DRM。这类设备的大规模应用可能会像当前德国的开关控制器那样使电网落入一个同样的陷阱(见图 1.6 上图)。这是因为由中央控制器来协调的自动化的分散式的决定会引起振荡。受因特网启发的打破同步的机制尤其是应用随机化的手段, 至少对人们来说看起来是使电网适应未来发展的关键一环。

5 小结

以电力生产各原则的调查为开始, 描绘了即将到来的电网可靠性方面的挑战, 它们源于不断增加的不稳定的可再生能源并网使用。本章讨论了 DRM 策略的基本思想, 该原理用于应对甚至是利用这一变化。特别关注了完全非集中式的管理手段, 这是受启发于为管理因特网而开发的技术。可以认为这是非常有前途的一个领域, 并且积极地进行了深入理论研究^[9,11,12]。

目前流行的 DR 方法的研究其主要思想还是集中控制式的, 它依赖于弹性用户的状态信息可以实时收集, 同时再施以调度以及可以从远端执行的短期偏移控制选项。环顾当前存在的技术, 想要实现这一点着实不易, 它要求实现: ①不同的度量方法以便记录用电随着时间的变化, 而不是单纯的对用电量进行累加; ②远端开关切换的方法; ③与单个用电单元进行通信的机制。最后一项原则上可以基于 IP 地址的概念而达成。还有, DR 机制的协调与记账也需要实现, 给网络协调员以及能源交易双方。可是隐私方面的问题会比较严重, 因为有大量收集到的信息可被用于对客户行为进行剖析, 这也许会成为当前流行的“智能电网”构想的显式的障碍。严格非集中式的方案则没有这方面的问题。诚然, 它的发展阶

段还处于婴儿期，但前景非常看好。

致谢

非常感谢 Arnd Hartmanns (萨尔州大学) 对本章的早期版本进行认真的校对。SmartCoDe 项目联盟为我们提供了令人振奋的机会来讨论和展示我们的发现，在此表示感谢。我们的工作还获得了 DFG (作为 SFB/TR 14 AVACS 项目的一部分) 的支持，以及 DFG/NWO 双边科研计划 ROCKS 和欧盟第七框架计划 [授权协议号 295261 (MEALS)] 的支持。

参考文献

1. Holger Hermanns and Holger Wiechmann. Future design challenges for electric energy supply. In ETFA, pages 1–8. IEEE 2009.
2. Bundesnetzagentur. EEG-Vergütungssätze für Photovoltaikanlagen, March 21, 2012. http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/ErneuerbareEnergienGesetz/VerguetungssaetzePVAanlagen/VerguetungssaetzePhotovoltaik_Basepage.html
3. Holger Wiechmann. Die Smarte Energiewelt aus wettbewerblicher Sicht Das Zusammenspiel aus Smarten Kunden, Smarter Energielogistik und Smartem Netz. In Smart Grid—Energieversorgung der Zukunft, VDE Kongress. VDE, December 2011.
4. Christoph Grimm, Stefan Mählknecht, and Markus Damm. A partially decentralised forecast-based demand-side-management approach. In Proceedings of the 2nd Workshop on eeBuilding Data Models, pages 193–202, October 2011.
5. Holger Wiechmann. Neue Betriebsführungsstrategien für unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen. PhD thesis, Technische Universität Karlsruhe, 2008.
6. Tamás Bertényi. Embedded Systems for Smart Energy Appliances, chapter Intelligent Small-Scale Decentralised Energy Systems. Springer, 2012.
7. Jörg Schürmeyer. EWE spürt Wende deutlich. Nordwest-Zeitung, March 12, 2012. <http://www.nwzonline.de/Aktuelles/Politik/Hintergrund/NWZ/Artikel/2822057/EWE-sp%FCrt-Wende-deutlich.html>
8. Shlomi Dolev. Self-Stabilization. MIT Press 2000.
9. Pascal Berrang, Jonathan Bogdoll, Ernst Moritz Hahn, Arnd Hartmanns, and Holger Hermanns. Dependability results for power grids with decentralized stabilization strategies. Reports of SFB/TR 14 AVACS 83, SFB/TR 14 AVACS, 2012. ISSN: 1860–9821, <http://www.avacs.org>
10. Jens Bömer, Karsten Burges, Pavel Zolotarev, and Joachim Lehner. Auswirkungen eines hohen Anteils dezentraler Erzeugungsanlagen auf die Netzstabilität bei Überfrequenz & Entwicklung von Lösungsvorschlägen zu deren Überwindung, September 2011. Study commissioned by EnBW Transportnetze AG, Bundesverband Solarwirtschaft e.V. and Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE e.V.
11. Holger Hermanns. Formal Methods in Energy Informatics. In Gilles Barthe, Alberto Pardo, and Gerardo Schneider, editors, SEFM, volume 7041 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–2. Springer, 2011.
12. Holger Hermanns. Quantitative Models for a Not So Dumb Grid. In Cormac Flanagan and Barbara König, editors, TACAS, volume 7214 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 1. Springer 2012.

第 2 章 IDES

Tamás Bertényi

1 简介

在讨论能源时，有以下关键点已经被认识到：

- 社会所使用的能源规模巨大；
- 终端用户为使用能源所支付的费用相当低廉；
- 这对于实现社会基础目标是至关重要的。

当然，以上三点必然也是互相关联的。精确来说它关乎到人们幸福和高质量的生活，因此社会在努力保持非常低的能源成本（这种战略措施发生在传统经济王国或市场水平之外，是由潜在动力驱动的）。同时，所使用的能源总量大得不可思议，尽管它的价钱非常低，它仍然是这个世界上最大的单一工业体，这也是以上观点的实证。能源市场具体规模的数据可以从国内或者国际组织那里轻易获取。例如，单从 2009 年来看，美国主要能源消费总额达到了 1.06 万亿美元^[1]，或大约 GDP 总量的 7%。换句话说，关键点是能源市场的总量远远超出人类的尺度，个人对于市场的体量无法直观理解或形成概念认识。

这些关于能源的基础的典型现实，在实践中有重大影响，对于用明智的可靠的方法改造能源工业的尝试离不开一些主导作用的因素，只要记住其中较突出的两点就好了：

- 巨大的能源市场要求任意一种解决方案要能够做到海量部署才值得讨论。随着人口的增长与发展而引起的全球能源消耗总量的增长，以及同时提出的能源生产无碳化的需求，只会加重这一说法。从正面来看，这也意味着会有大量的经济政策来激励能源生产工业的创新；哪怕一小步的改进所带来的潜在回报也是远远值得冒险的。

- 能源固有的低价意味着任何新的商业模型都需要能够运行几十年以上。能源工业（尤其是当涉及技术解决方案和资本投资时）是一场马拉松赛跑而不是一段冲刺。这种认知也强烈规范了参与进来的人们在商业角度的行为与期望。例如正是基于以上实际，提高能源效率的各种努力难以转变为可行的商业模型。

2 IDES 的定义

总体上说, 智能小规模分散式能源系统 (Intelligent Small – Scale Decentralized Energy Systems, IDES) 的概念是关于能源如何生产与供给以及工作在何种商业模型下的全局图。特定的技术问题, 尽管它们很有趣味并吸引眼球, 终究还是比不上它们所能产生的潜在的能力更具决定性 (见图 2.1)。

一个典型的 IDES 产生于一种称为“邻域能源”的想法, 如图 2.1 所示。可以把它看作一栋大的建筑, 也许是一座商业中心, 或者市政设施例如医院、学校或公共交通枢纽。但也许它就是一组小型建筑, 包括居民住宅 (尽管在如今的很多区域对这种场景存在着立法方面的屏障)。在进一步发展的概念下, 各个邻域能源之间的边界无须严格限定, 甚至还会随着时间变化。

正如从名字中可以看到, 这种能源系统包含的是本地小型的能源生产。这些本地能源生产 (Local Energy Producers, LEP) 可以包括风机、光伏系统、地热、供热供电混合系统等。这些 LEP 并不总是要集成在建筑里面。比如说一个邻域能源区内新建了一栋居民住宅, 那么完全可以在它附近合适的位置建一个独立结构的 100kW 风机, 以及 30kW 的光伏阵列。

在这个邻域内可以添加用能产品 (Energy – using Products, EuP), 这在现代社会中应有尽有。关键是这些单元不只是负载, 它们有着不同的特性可以使得它们能够像参考文献 [2] 和本书第 1 章所描述的那样在不同程度上可接受控制。

一个非常有用的, 尽管严格来说不是必需的特性是拥有一个本地能量存储设施 (见第 3 章)。能量存储有各种形式, 已经有一些 EuP 可以当作虚拟存储来使用了。最终会看到大小适合于邻域能源具有特殊目的的电存储设备将会以合理的价格出现。即使在这之前, 可外接充电的电动汽车的大量应用也会在一定程度上提供能量存储, 尽管会有一些额外约束和限制条件。这种技术还太新且昂贵, 但它所带来的好处是巨大的, 所以即使在今天看来也接近合理了。随着技术的成熟, 它们的合理性将不证自明。

最后值得强调的是邻域能源还与更大规模的电力传输网络相连, 电网将各种邻域能源绑定在一起, 它还把大的集中式的发电设施连起来。很多旧有的发电厂会存在几十年, 一些集中式的发电厂总会找到自己的角色, 因此需要调整在整个能源系统中集中式的和分散式的发电能力的比例, 有一种思路认为未来的发展主要是基于小型的分散式的能源系统。

覆盖于所有的这些 EuP, LEP 和能量存储设备再加上邻域能源和它的功能之上的是传感器与通信系统构成的信息网络。高度集成的微电子 (在设备中包含传感器、执行器、处理器和加密) 是一项关键的使能科技。作为结果的“物联

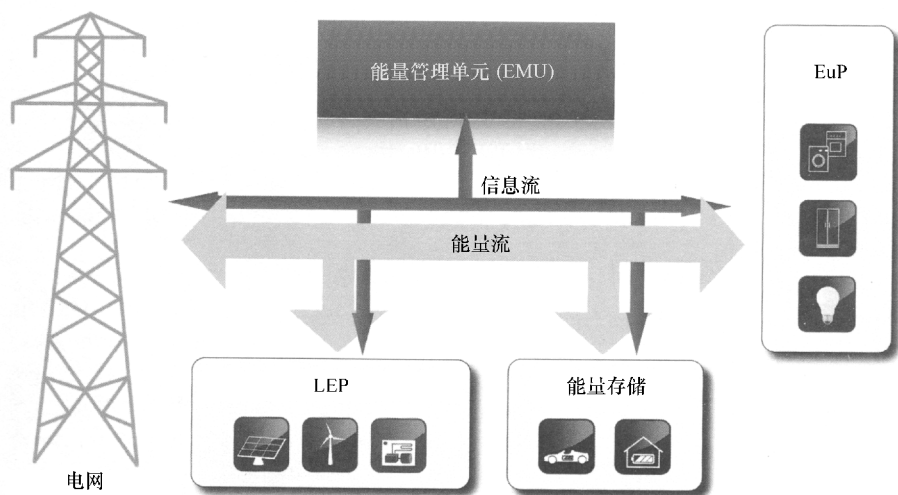


图 2.1 智能小型分散式能源系统（其特征构成有，由本地化信息以及连接 EMU 和 LEP 的能源网络构成的邻域能源、能量存储以及 EuP。向“智能化能源”的转变使得邻域能源可以本地化进行能源生产与使用的优化。邻域仍然保持与更大的电力网络连接，在那里它可以作为一个虚拟发电厂，可以基于国家电网的信息输入智能地进行负载切换甚至是能源输出）

网”提供了关键的能力来测量与控制整体的有机的邻域能源。这是把邻域从“哑能源”到“智能能源”进行转变的基础组成部分。

到目前为止所描述的这些单元都还属于基础材料，而把整个智能分散式能源系统概念绑定在一起的“关键武器”是能源管理软件，以确保整个系统在内部以及与外部电网交互方面最优化运行。这是标题中所提到的“智能”的部分，也是给整个概念增加价值的部分。

智能的小规模分散式能源生产的概念在如何以及为何生产能源方面意味着一场革命。它引入了能源生产在优先级排列和激励方面的构造转变，远离以盈利为中心的大规模生产企业，转到单独的本地需求、问题和动机。目前在集中式的能源生产概念下大的公司所受的激励是要使能源生产可营利。但是在小规模分散式能源生产概念下对利益相关人的激励是按照性价比高的方式生产能源。这种细微的但重要的区别却是个关键。

转变到这样的系统要在能源社会中表现出民主来。公众的成员要作为解决方案的一部分而不仅仅是问题的一部分。它提高了对于能量从哪里来以及使用了多少的认知度。小型分散式的能源生产的界定是它倾向于位于人们生活、工作和游玩的地点附近。它总是紧挨着使用点，靠近建筑、基础结构和人们活动的区域。通常这意味着避开遥远的地区或乡间。

2.1 有限 IDES 实现实例

IDES 的部分实例如图 2.2 的能量流动图所示。从安装了小型风机 LEP 的邻域能源（在本例中为一个商业建筑）中提取 7 天的真实数据，画出此期间的能量流动图，会看到一个清晰的模式显现出来。例如这栋建筑的电力消耗呈现出工作小时高峰周期的轮廓基线。在周末建筑物就不使用了，所以只表现出基础负载。

尽管不是那么规则，这个 LEP 还呈现出周期性的波动。像在不稳定性一节所讨论的那样，有两个时间尺度。长期的波动与每日太阳加热制造风能的周期相关，甚至更长期的与气象系统相关。星期四～星期六我们会看到一个隐现的日周期。更显著的长期不稳定性表现在星期一上午～星期四晚上的几乎完全没有风能的时间段。

在这个长期不稳定性之外，还会看到短期的波动，在本例中为小型风机所表现出的不断增强的扰动。例如尽管是在每日周期线上仍会看到非常明显的波动。

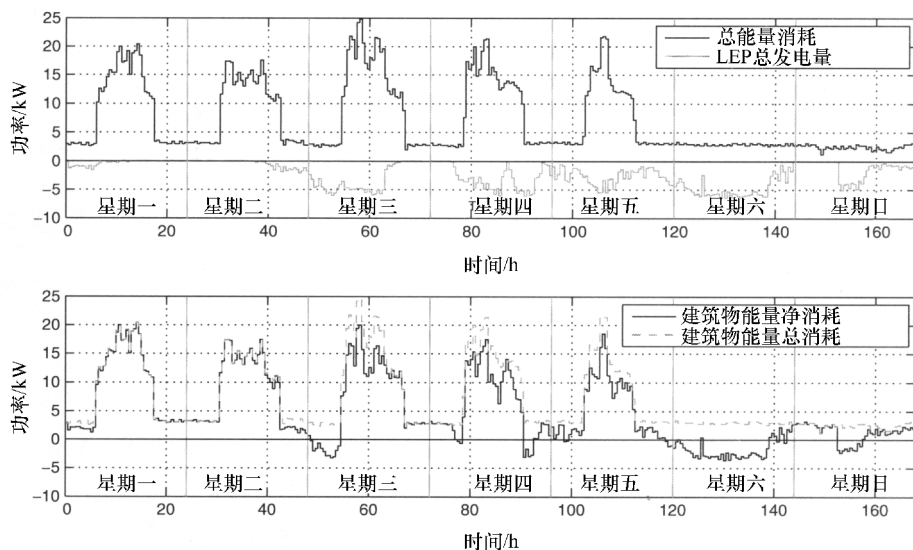


图 2.2 一个有限 IDES LEP 场景的能量流 [时间跨度为一整星期，能量表示为 30min 周期的平均能量值。上图：建筑物的总能量消耗加上 LEP 的总能量生产，它们都有明显的模式。下图：合成的建筑物净消耗（实线）与原来的总能量消耗（虚线）对比。LEP 的存在对建筑物的用电有明显的正面影响；它有时会减少峰值用电，在个别时候这栋建筑甚至会像电网进行净能量输出。然而严格来说本例只是“哑能源”的例子。还没有能源流动的智能管理以最大化总体的效率或效能]

这个真实的实例研究是具有本地发电设备的邻域能源的关键样本。它连接到了一个更大的输电网络，这个网络可被视作具有无限的负载与供给。如果这个站

点需要能量净流入，电网就可以进行供给，反过来如果这个站点的电力有剩余则可以向电网输出。在给定的时间段，例如星期六当基础消耗负载很低而发电量很高的时候，这一点相当可见（假设周末来了一场大的风暴）。然而在 IDES 和电网之间的这种舒适的关系并不是可持续的，当电网变得陈旧以及/或者分散式的发电系统增加时，需要一个解决方案以使得电网可以依赖 IDES 来提供平衡与支持。

图 2.2 的下图清晰地表示了能量消耗特征中 LEP 的影响。从电网角度看 LEP 的影响是减少该站点的能量净消耗。LEP 有时可以成功地减少峰值能量水平，并且在一个星期这样长的时间范围内可以减少相当数量的能量消耗。

然而该演示距离理想的 IDES 解决方案还相差甚远。具体来说这只是一个“哑能源”的例子，而 IDES 系统可以表现出“智能能源”。例如目前还没有努力为该站点的能源消耗进行“整形”，在风力最稳定的期间存储能量然后在消耗最强的时间段再释放出来。并且也没有努力来平滑从电网侧可以看到的明显的负载不稳定性。也不存在战略的可能性，例如将在后续虚拟电厂这一节将要讨论到的。实例中的邻域能源是大的电网中的被动参与者，而一个真正的 IDES 应该是一个主动参与者。

3 经济压力驱动能源系统转变

为了理解为什么 IDES 机制是全球能源市场一个有力的竞争者，需要理解驱动转变与变革的经济压力。在一个考虑到整个电力市场的自由市场模型下，这些驱动压力（以激励和抑制的形式）可以塑造一个理想的适应性的能源系统来最好地满足整体需求。像后面会看到的，社会也会呈现出很重要的外部人为的约束。

引用 Drucker^[3] 的一篇论文，可以对能源生产变革的主要驱动力进行分类：工业与市场结构、未预料的外部事件、人口学、认知的变化、新知识以及不可协调性，这一点也必须加到社会需求的分类里。

3.1 工业与市场结构

邻域能源的客户，无论它是一个公司、一个市政服务部门，或者是家庭与个人，他们想要购买的是能源供给。单是有能源还不够，还需要能源直接输送到他们想用的地方（供机器设备将其转换为另一种能量形式），并且更具体地说，随想随有，这一点很关键。电力市场并不像其他市场那样，供应商不能按照自己的时间表来生产、装运、存储并交付给用户，而是不管需求量大是小，只要有用电需求，就必须供给。如此运营一个产业是代价很大的，然而已经直观地看到需求侧管理是如何带来好处的。

3.2 未预料的外部事件

严格来说,气候变化是目前的能源方案直接导致的。尽管这样,从商业视角来看,这是一个正在产生重大影响的“新”的外部动因。确认气候变化受碳排放的影响意味着很强的刺激因素,促使人们既要减少能源消耗同时也要寻求向低碳能源转变,这两点 IDES 都可以帮助实现。

气候变化的问题已充分体现了重要性,下面来看一条外部参考。Lester 和 Hart 在他们的著作“Unlocking Energy Innovation (为能源革新解锁)”^[4]的第1章对气候变化所带来的挑战进行了很好的综述。尽管是站在美国的视角,书中还是把气候变化巨大问题淋漓尽致地呈现出来。他们提出“40 内减 80”的建议,需要美国在 40 年之内将碳排放减少 80%。最后他们指出,该问题归根结底可以描述为,“如果到 21 世纪中期经济活动与碳排放之间的联系没有打破,全球能源生产没有显著的脱碳,科学实证向人们表明到时人们将失去几乎所有的机会来避免气候变化所带来的恶果”。

3.3 人口学

人口学正在给全球的能源市场施加强烈的影响。首先,世界各地的人口都在增长(通过生育以及移民),并且还伴随着单位个人能耗的上升,这是一种全球的趋势。能源消耗随着新兴经济体的发展而增加,这并不意外(从经济视角来看待能源使用,BP 的“2030 年能源展望”给出了很好的说明),但另一种趋势则是我们社会的电气化。我们大部分的能源使用,例如家用电器或者信息科技,其增长都需要电力能源,甚至传统的化石能源用户,例如汽车或者铁路运输,也正在向电力系统转变。英国能源和气候变化部(DECC)对这种驱动力进行总结指出,如果我们的社会要满足 2050 年的碳排放目标,我们的能源生产必须完全去碳化,将可用的碳排放指标保留给航空业^[6]。IDES 不仅可以帮助发达领域切换到低碳的未来,还可以帮助新兴领域避开以资金密集型为中心的能源使用模式以及该模式固有的缓慢的产业化速度。

3.4 认知的变化

现今社会对绿色的方案都非常推崇,不仅仅是出于气候变化的考虑。事实上人们对于不可持续的做法都普遍持有道德蔑视。尽管人们仍在争论客户应该为“道德”能源付什么样的价钱,无可争议的是人们都认为它非常重要。

3.5 新知识

信息与传感器技术(例如智能蓝牙和物联网)这样的新科技,联合新兴的能源存储技术与能源生产技术(通常会与其他快速发展的产业共同演进,例如交通运输的碳纤维电池、轻型结构、光伏硅处理),共同驱动产生新的解决方案。

说到这里,还是要讲究务实一些。Lester 和 Hart 在他们的著作“为能源革新

解锁”^[4]中研究了能源革新的主题。他们提出，人们不应指望突破性的事件发生，就算真的发生了，考虑到能源系统庞大的规模与惯性，想要避免最坏的事情发生，它还是来得太迟了。“用于攻克重大难关的大多数科技，它们基础的科学与工程特性都是已经被人们所熟知的，只是它们的性能在多个维度上有待提升……这是能源革新真正的机遇”。

就当前讨论范围而言，问“为什么能源革新这么慢”也不是很有意义的。他们列举了与技术革新过程相伴随的一些因素，其中有一些，例如目前的能源系统过于庞大的规模，就是能源系统所特有的问题。可以说更多的可管理的 IDES（相比大规模近海风电场或撒哈拉沙漠太阳能电厂）可以使它们在可扩展性与交付时间上获得优势。

3.6 社会需求

像本章开头所提到的，廉价与可靠的能源可以促进社会平等，单方面因为经济压力推高成本让人无法接受。相反，任何降低费用的做法都能获得真正的好处（尽管可能会不那么显现，如果成本压力已被人为约束的话）。各国还对能源的安全有强烈的需求。总的来说，全世界都需要对所拥有的资源进行充分利用，而大规模集中式的能源系统是在这一目标没有确立以前的时代设计的。

4 IDES 在未来能源供给中的机遇

到目前为止，已经介绍了 IDES 的概念，并且指出目前的能源供给解决方案已经到了发生改变的成熟时机。但是 IDES 可以带给人们的特殊的机会只有当人们看到它们如何与现有的系统真正结合的时候才能证明它们自己。本节会谈及 IDES 相关的关键技术问题，以及它们如何带来更好的整体解决方案。

4.1 电网基础结构与稳定性的问题

与“电网稳定性”难题相关的术语覆盖了广泛的问题。为方便本节的讨论，把它定义为任何阻止整个输电网履行可靠能源供给任务的问题。

从最简单的层次来看，电网稳定性的问题可认为是对于给定的分散式负载和少数的集中式发电设备，电网和基础结构的恰当行为就是将能源输送给这些负载。任何超出容限范围的偏移都会导致输电网出现故障。有三个不同的原因会引起扰动。

第一，随着时间的变化原先最优化设计所处的环境会跟着改变，这是相当常见的。例如，人口学与社会学的改变可以极大地增加人口密度。在现今社会这种改变可以发生得比以往更快。提供能源给人们使用所需的成本可不是简简单单的把集中化能源电厂的数量翻倍而已，而是也要把分散式的电网联系起来。为应对这一效应，已有强硬的法定控制流程来确保配电网得到所需的修正。可是，控

制过程可能会失效，并且现实中的财务约束也会降低对分散式的电网的控制效果（相反这些对于电网的约束也许会阻止人口学的改变实现社会所期望的影响）。IDES 可以提供有价值的发展路线来绕过这些约束。例如，对于工厂的扩张如果使用了 IDES 则可以明显降低扩张的影响，这样就避免了对本地电网进行加强或是新建一个基础结构。

与电网稳定性相关的另一个问题来自于基础结构本身的废旧与老化。尽管电力分配网络被设计为可运行几十年，但它确实会消耗与老化。IDES 的应用可以通过降低本地负载的规模来减少替换老化设备的紧急情况。也许对 IDES 来说更有价值的事情是它们可以对老化的基础结构产生的意外事件进行动态响应。如果处理得当，它也许会把这一优势转换为货币，对 IDES 的运营商产生额外的现金流。

最后，由于大自然的反复无常或者是意外事件而导致的元器件意外失效也会影响到电网稳定性。这些外部事件也许会难以预测，但是在危急时刻，动态 IDES 又一次可以帮助人们为电网提供本地化的支持和稳定性。

智能的分散式系统可以通过有效的“把负载变聪明”来处理上述问题。在这些情形下，智能分散式能源系统可以表现出显著的财政节约。抛开别的不说，这些系统可以使得人口的增加不至于引起配电网络成本的大幅增加（前提是潜在的不稳定性应被恰当的处理，否则它们会反映到电网成本的增加上）。上述所有场景的关键是 IDES 降低它的负载的能力，或者是在一段时间之内甚至可以像电网净出口电力。这一概念会在后续内容细化讨论。

电网的一个更微妙的问题通俗来说是电网的不稳定性会经常导致大规模停电。这是与系统内在复杂度相关的，例如电网，包含了为数众多的节点。整个系统对扰动的反应完全是非线性的，并且带有很强的反馈机制。一个明显很小的且局部的问题能够快速发展演变为巨大的系统级紧急情况（关于电网稳定性及相关主题，有演讲材料和视频讲座可供下载，来自于艾萨克·牛顿数理科学研究院能源系统周刊^[7]）。

正因如此，电网稳定性问题给智能分散式能源系统带来了难得的机遇。存在着相当庞大的财政刺激，这可是与实时电力市场根本不同的经济因素，它专注于将整体电力市场电力供给的效率与有效性最大化。在实际操作中，问题演变为高层次的负载均衡与负载匹配。但是当谈及电网稳定性时，问题会立刻上升到与强烈的社会需求相关。电网故障或系统级停电所影响的范围可能超出国界，波及几千万甚至是几亿人口。人们的日常生活遭受影响，同样还影响到工业、经济产出、安全与社会稳定、健康以及社会福利等。一次大规模停电事件所带来的经济损失（尽管只持续几小时），与庞大的人口基数相乘，其结果要以数十亿美元计。例如，“2003 年美国（东北部）大停电的经济损失为 60 亿美元，很有可能会损失更多^[8]”。在这种情形下，IDE 系统可以发挥关键作用。电网运营商只有

少量的可以对系统施加影响的控制器，这意味着他们可以拉的“操纵杆”是有限的。典型的做法是将发电设备隔离，或者是抢先将有不稳定迹象的配电支路隔离。这些“操纵杆”不仅数量有限，它们还很笨重，部署得也很粗糙。与之对比，由延伸到远端的高度协调的 IDE 系统构成的网络，在管理电网稳定性方面可以提供难以置信的精细控制。这些 IDE 可以经事先约定，在极端和异常情况下牺牲它的本地负载（甚至可以将本地生产和存储的电量输回给电网）。由于意外事件的时间短暂，每个 IDE 所贡献的电力调节量不是很明显，但经济刺激可为社会提供数量巨大的调节杠杆，因此总的货币政策影响是很显著的。

要得到接近真实的数字需要大量的研究才能得出，单凭经验推测，在其他条件都不变的情况下，加入电网稳定性的相关活动会使 IDE 系统产生的能源的财务价值翻倍。作为回报，重大规模的投资会被推迟，本质上会把系统运营推进极限。

4.2 高峰定价与实时电能市场

可以这样说，能源供给使用自由市场机制可以驱动整个系统实现最优（但有一些警告）。一般来说，自由市场手段会引入高峰期定价结构，并最终形成更加细致的实时能源市场。自由市场机制广泛地说会包含用电高峰期的定价结构并最终包含更加细化的实时能源市场。在目前的系统中，终端用户与这些几乎是隔离的，部分原因是他们参与能源市场活动的的能力非常有限。峰值定价在有限的程度上可以驱动用户的行为，但是实施能源定价所带给电力市场的全部好处却还未能得以实现。这陷入了一个两难的境地：因为终端用户无法参与，所以就没有自由市场的实时定价；因为还不存在一个这样的市场，也就无法发展可以参与实时能源的用户。

但是 IDES 的一个很大的优势就是它恰好具备这个能力使终端用户可以参与实时能源定价。LEP 的本地生产、本地能源存储，还有通过能源管理来控制能源消耗，将它们组合起来意味着 IDES 可以在一定程度上来控制能源消耗的时间安排。尽管大部分 IDES 表现出的都是能源净消耗，它们仍可以在一段时间内减少能量的消耗值或者甚至会临时成为电力的净输出。很明显，如果实时能源市场的定价结构传递到 IDES 系统，它可以做出成熟的决策来最大地降低电力输入的成本以及增加本地生产能源的经济价值。这对 LEP 来说尤其有价值，因为它的经济合理性会被有效提升，否则它仍然会是投资密集型的。

自由市场定价给 IDES 也会带来经济利益，进而使得引入自由市场定价的做法更加合理。IDES 就是通过这样的方法来对我们未来的能源系统带来极大影响的。

4.3 社会级别经济分析

转向大量应用智能小规模分散式能源这样的能源系统具有非常好的成本效益，尤其是当站在系统最高级别的视角来看的时候（也就是说以社会整体而不是以个人或组织为视角来看这些成本）。当然人们也许会将气候变化的成本也加

入分析，因为这体现了人类社会内在的短视行为。要不要现在就多付出一些来减少明天的碳排放问题，还是等到明天问题严重扩散的时候来付出更多？在气候变化领域之外还存在着另一种经济影响。例如优化的智能小规模发电设备可以更好地利用整体能源系统来提高最顶层的利益。像 IDES 这样的发展与变革方案对于整体能源供给提供了另一种发展路线，不用额外的基础结构成本或者甚至可以推迟基础结构报废的成本。从根本上它所实现的能源系统使得商用角度的经济驱动力与社会经济的需要是相协调的。目前激励大型发电设施发电并供电的是为了营利。但是对于小型分散式能源生产，激励利益相关方的是以好的成本效益发电。这一微妙但重要的区别是成功的关键，会让整体的系统具备更佳的成本效益。

4.4 可持续能源

可再生能源和分散式能源可以构成最佳组合。已经阐述过真正的 IDES 都会包含本地能源生产，在绝大多数情况下这些都会是可再生能源。最终的结果是它们不仅提供了可再生能源，还有可持续能源。这其中隐含的解释是 IDES 系统实现所刻画智能能源本身就是在向可持续能源迈进。尽管其中的一些能源来源是非可持续发展的。

4.5 可扩展性

在某种意义上，这一点直接服从人们的需要，即能源的未来应该是可持续发展的。如本章简介中所介绍的那样，社会的能源使用总量相当巨大，并且全球人口的压力只会增加这一需求。能源供给的增长本身必须是可持续与可扩展的。

传统的集中式的能源生产，不管它们是大量的化石能源发电厂、大的风力发电厂或电网基础结构本身，都是总量巨大、资金密集的工程项目。完成这些工程所需的这类财政与专业技能的供应量有限。对于社会能以多快的速度来建立集中式的能源生产系统，是有一定上限的。

作为对比，IDES 的实现可以更靠近客户端的水平。生产制造可以像消费品行业那样有为数众多的公司与国家在并行工作。同时安装与运营 IDES 所需的服务并不会与已经成熟的电信市场有什么不同。

总的结果是 IDES 的发展速度可以远远高于大型集中式发电厂，尤其是当考虑到电网基础结构不必跟着一起增长时。这对于希望转换到更加低碳的能源结构但仍然快速发展的国家是很有吸引力的。可以用非洲电信市场做一个类比，它们抛弃了西方国家从固定电话通信市场逐渐演变到移动电话网络的发展模型，新兴的通信市场直接快速地应用分散式的移动电话系统。

4.6 波动性

谈及可再生能源，经验上的认识就是它们的波动性。关于波动性首先需要知道的是它事实上影响着所有的能源生产，而不只是可再生能源（Amory Lovins 对此有更深入、恰当的描述^[9]）。一个达到公用事业规模的风力发电厂，它的产出

的变化范围可以从风平浪静时的零输出到风暴来临时的 100% 或超出“额定”发电量，典型的平均“能力系数”一般约为 30%。

传统的集中式发电厂一样也会有波动性的问题，只是它们的波动特征有所不同。例如一个大型的核电站正常运行时会工作在 100% 的基本负荷，但如果出现故障，它将突然停机，几乎是在瞬间失去它的全部产能。尽管风力发电厂的波动性需要不断地去应对，可以说核电站的这种突发性波动对电网的影响同样突出。很多传统的化石能源电厂具备的优势是它们的电力输出更加可控以满足电网的需求，可是这些电厂除了定期的关机维护之外也会有偶发的安全事件停机。

最后，对于集中式的公用事业规模的发电厂，应对它们的不稳定性历史上的方法都是提供一种后备发电能力，通常被称作“热备份”。这种方法是让一些发电厂保持在热的待机状态，以便一有通知就可以提高发电量。当然，这种手段昂贵且低效，除了建立这些后备发电厂的资金成本之外，成问题的是这些电厂仍然在消耗燃料产生电力，但却没有满负荷（在这种情况下才会高效或者经济效能最好）工作。迄今为止人们一直以为保持一定数量的发电厂作为热备份是必要的，以此来确保当发电容量意外损失时仍能维持供电水平。总的来说，对于后备发电能力的需求可被看作集中式的公用事业规模发电模式的内在成本，但并不是任何一种发电方案都有这个需求。

使用大量的 IDES，在一定物理区域内分散布置并与集中的电网相连，这种方法很可能会降低整体的不稳定性。以两个 IDES 系统为例，它们使用小型风轮机作为本地发电设备。如果它们的物理地点相距很远，例如超过一个典型的气象系统的范围，这样当有剧烈风暴通过时，它的不利影响不会同时波及两个站点。一旦聚集了一定量的小型分散式 IDES，一些不稳定性的负面影响会被随机抵消，这会对整个区域的电网带来正面影响。然而这种方法的有效程度还是受限的，因为还有一些强大的周期性的波动是会在全球范围内造成影响的（即日照的昼夜变化会影响光伏发电以及风力流动）。

目前所讨论的不稳定性是大多数人会谈及的精确来说是宏观的长期的不稳定性，电力波动的时间周期在几小时或几天。除此之外，IDES 中应用小型可再生的本地发电设备还会引入一种额外的不稳定性，即短期波动，时间周期可能是几分钟甚至是几秒。这在小型风轮机系统中表现尤为严重，因为这些涡轮机都倾向于安装在扰流剧烈的地方^[10]。也许需要给出技术解决方案才好让它们大规模应用（例如 IDES 内的短期能源缓冲）。

4.7 成本与经济性

IDES 的成本与经济性对于它们能否大规模应用是至关重要的。最开始的问题有很大一部分是来自已建成使用的系统的竞争。通过补贴与自由市场驱动的结合最终可以使 IDES 实现独立自给并取消补贴。灵活的定价策略和电网的支持可

帮助这些系统实现持续的利润增长。

5 关键使能技术

智能小型分散式能源系统所需的很多因素如今都已存在了，后续内容将会论述它们。另有一些或已建立或已成形，在前述“新知识”的内容中将它们列为基础驱动力。但仍有一些因素目前还不够成熟，无法应用，需要在这里突出介绍一下。

5.1 对于智能小型分散式能源的管理

在前述内容中已经介绍了对于 IDES 的“智能”管理，但仍需强调的是，它是使整个概念能够实现的最关键一环。基本上需要一本书来讲解这个主题。

5.2 能源存储

广义的能源存储的概念是 IDES 的重要组成要素。专用的能源存储方案（相对其他非直接能源存储的方法来说，例如可调度负载或者充电式电动车）也许会将整个概念推向引爆点的最关键的要素。高性价比的小型能源存储应以非集中式的方法来使用，这一观点已在业界广泛接受。遗憾的是，这一领域仍需长期的研发工作才能带来成果。

5.3 能源预测

如前面所述，小型可再生能源技术在很大程度上被定义为不稳定能源生产。使用能源管理方案最大化所生产能源的本地使用，这一理想目标当输出总是快速的在 0 到几千瓦间波动的情况下很难实现。因此一种关键的信息技术就是能够对小型分散式能源生产设备的产出进行有用的预测，再将预测结果反馈作为能源管理策略的输入。

5.4 能源政策、立法与法规框架的革新

学过电力电气的人对于本章中所列出的问题并不会觉得新鲜或者奇怪。这些问题已经存在并发展了几十年，如果回退从历史的角度来考虑电气系统就会发现这些问题很熟悉。随着这些问题或动因发展演变（其中有一些速度相当快），以致变革的压力非常显著，却仍没有看到有什么基本的变化发生。问题原因在本章的开始已有基本的描述。能源，具体来说，廉价的、可靠的以及可获得的能源，它是如此关键的社会需求，以至于各层次的控制都强加于自由市场经济之上。社会与政府在系统的各个层面上施加控制来影响能源市场的行为，包括国家级政策与战略目标、行业的职能结构约束、国家福利政策与成本控制法规等。整体目标（其中的大部分）非常宏伟并且是基于美好的愿望，但它已有组织地施加到这个不断发展变化的世界有几代人的时间了。施加到系统的这些控制与约束还有另外一种效应，就是会将某些技术与思想封锁起来。同时，引起改变的基础压力一直在不断增加，不可避免的，社会最终会达到一种“大坝即将崩塌”的状态。

因此，所需要的是整个社会范围的勇敢的、有创见的能源政策变革。需要发起对能源市场起决定作用的政策、立法、法规的广泛革新，最好是跨越大陆邻国甚至是全球性的。变革必须兼收并蓄，满足能源系统所有参与者的需求。它还需要强烈的社会控制与监管，以确保维护基础的权利。为了使能源生产真正的新方案能够取得预期的成果以及繁荣兴盛，这种革新绝对是至关重要的（本章并不是想要对新方案应该是什么样子进行规范，而是想要表明对于那些过时的方案或者具体解决方案给系统带来的人为约束，都将会被快速演进的新的方案代替，这里试着对这些新方案进行预测）。

令人兴奋的补充消息，可以认为在世界上很大一部分地区，演进到某种能源系统的确定的结构在历史上还不存在。尽管在过去这意味着相当高的社会成本，随着社会的发展与演变现在难得的机会已经呈现。那些关于社会能源使用的最大胆的和具有创新精神的变革将会来自于发展中国家的新兴市场，这不是不可能。没有来自前几代的惯性阻力，却同样具备与发达国家一样的需求与驱动力，这些国家与地区很有机会去定义未来的能源系统。

6 未来：虚拟电厂与工业

单独的邻域能源同时具有内部功能（到本章目前为止所讨论的）以及外部功能。回顾一下图 2.1，每个邻域能源都是与电力网络相连的，它们同样也可以通过信息网络连接起来，这样的想法并不牵强。当单独的 IDES 与集中式的大型发电厂协调工作时，会诞生“虚拟电厂”（Virtual Power Plant, VPP）的概念。

通过对电网内的多个 IDES 的行为进行协调，可以更好地对现网和能源基础设施加以利用。例如，在用电需求增加的时段，可以要求 IDES 转变能源管理调度方案来减少它们的总负载甚至是增加它们的电力净输出。同样的，如果出现配电网本地容量不足，可以指定一些 IDES 向外输出电力。在这些场景下，可以相应地增加费率以使 IDES 从中受益。

7 小结

全世界正在广泛应对能源的未来所提出的挑战。从社会的不同方面会有不同的观察，因而产生不同的视角与优先级。举个例子来说，可以看看英国政府的能源与气候变化部，还有最大的能源供应商 BP 的观点。尽管他们对于采用何种过程以及可以接受多大的成本的评估结果会有所不同，他们有强烈交集并达成一致的看法是，以往的商业或者是小步前进的方法都帮不到人们，不能为人们提供安全的、稳定的能源未来。这种说法暗示着人们做事情的方式需要的是更加根本

的、深远的和破坏性的转变。

社会常常是倾向于寻找“天外救星”，即一种新的重大技术突破来拯救。人们面对的能源挑战，其绝对压倒性的规模使得这种技术突破（或许是安全的、能负担得起的核聚变技术）是一种革命性的、里程碑式的才能产生效果。坚持对这样的“救世主”抱有希望看似很有吸引力，可这样依赖命运和不可预知的机会事件所面临的危险实在是太大了。因此更务实的做法是扩展视野到可以构成破坏性转变的事物上去。不是一个单独的、巨大的技术通过剪切力施加变化，这种破坏可以是新的做事方法、新的概念、深入到全球能源系统组织内部的转变。从目前的集中式能源模式过渡到智能的小型分散式能源系统将会提供所需的破坏性转变，可以彻底打破一如往常的行为模式。实际上，它是经过了一种换算，将所需的单一的、大型的技术突破替换为非集中式方法所需的成百上千的更小的技术突破。

此外，有论据指出能源需求更具体来说是社会对能源生产的去碳化的需求，需要大量和快速地展开部署。因此对于任何新的能源系统来说，一个绝对关键的标准就是它能够做到快速铺开。小型的分散式能源系统本身固有的就提供一种路线使得系统可以快速和广泛地被采用。不是依赖少数专门的集中式能源生产场所，它们需配备后勤以及交汇的政治与经济，分散式能源系统所依赖的是开发出可管理的实施方案，聚焦于基础架构，以此来大规模地对它们进行复制和重复。最终得到的是千千万万个可再生能源发电厂，分散遍布于国际范围，由管理中心进行社会化地控制与调节。

参 考 文 献

1. U.S. Energy Information Administration, State Energy Data System 2009, Table E8. Primary Energy, Electricity, and Total Energy Expenditure Estimates 2009 (released June 30, 2011), available online at <http://www.eia.gov/state/seds>
2. Christoph Grimm, Stefan Mahlke, and Markus Damm. A partially decentralised forecastbased demand-side-management approach. In Proceedings of the 2nd Workshop on eeBuilding Data Models, pages 193–202, October 2011
3. Drucker, Peter F., “Innovation and Entrepreneurship”, Harper Collins, NY, USA. 1985
4. Lester, Richard K. and Hart, David M. “Unlocking Energy Innovation”, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2012
5. “BP Energy Outlook 2030”, London January 2011, available on-line at <http://www.bp.com/energyoutlook>
6. “Pathways to 2050 – Key Results, MARKAL Model Review and Scenarios for DECC’s 4th Carbon Budget Evidence Base, Final Report”, ED56609 Issue Number 1, 11th May 2011
7. Isaac Newton Institute For Mathematical Sciences, Energy Systems Week Workshop, May 24–27 2010. Available freely on-line at <http://www.newton.ac.uk/programmes/SCS/scsw07p.html>
8. “Can We Prevent Another Blackout?”, Time Science, BRYAN WALSH Monday, Aug. 11, 2008. Available on-line at <http://www.time.com/time/health/article/0,8599,1831346,00.html>
9. Lovins, Amory, “Reinventing Fire”, Chelsea Green Publishing Company, 2011.
10. Bertényi, T., “The Small-Scale Turbine Wind Resource and Turbine Design with Real-World Field Measurements”, RenewableUK Annual Conference, Manchester UK. October 25–27, 2011.

第 3 章 智能电器的建模设计

Joseph Wenninger、Javier Moreno、Jan Haase 和 Christoph Grimm

1 简介

在智能电器和智能电器中的嵌入式系统设计开发中，理解它们所处的整体场景是很重要的。进行整体场景的仿真并通过修改系统或场景的参数来进行实验是完成这一任务的一种方法。

自顶向下的设计与仿真使得人们可以在最初用高层次的抽象来描述这个场景，然后再逐级精炼。最抽象的层次是描述一个建筑和一些执行器（actors），包含其中的是单纯行为模型的实体。起初对于能量流动和信息流动是不加区分的（非保守建模）。在混合级别的仿真中，一些部分可以被细化然后再跟其余的高层次建模的部分一起模拟并保持性能。精炼过程的最后环节是设计与模拟传感器/执行器节点的固件以及它所控制的设备。图 3.1 给出了这种自顶向下设计的过

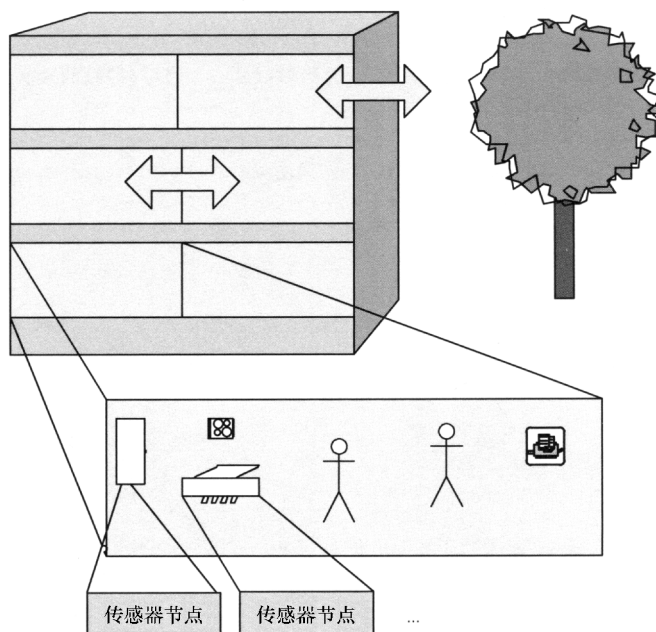


图 3.1 建筑物和耗电电器的自顶向下分解视图

程分解。在整个设计过程中电力消耗模型逐渐细化并变得越来越精确。更高的精确度带来的是更长的仿真时间的开销，因此最初的高层的或抽象的仿真对于概括性的快速发现第一手的可优化点是很重要的，然后只需对这些内容在后续阶段进行细化。

2 抽象建模

对于日常生活环境的高层次抽象会涉及如下对象：

- 电器，例如家用电器；
- 居民，就是用户；
- 被动型热能存储，智能加热所存储的能量；
- 外部环境影响，隔离不良所带来的能量损益；
- 自然/天气（户外）；
- 邻近环境，例如公寓隔壁的热量（室内）。

那些需要优化电力消耗同时又提供服务给用户（居民）的电器是一个重要的群组，电器内部的用电管理行为需要不妨碍用户的日常工作与生活，至少是通过不令人烦扰的方法。

根据参考文献 [1]，耗能设备可以分成几组，区别如下：

- CHACON（充电控制，charge control）；
- VST SVC（虚拟存储服务，virtually storable service）；
- SCDSVC（可调度服务，schedulable service）；
- VARSVC（多样服务，variable services）；
- CUSCON（客户控制，custom control）；
- ETOSVC（事件—超时服务，event – timeout service）；
- COMCON（完全控制，complete control）；

在本章中为简单起见，只粗略分为四组：

- 常开；
- 周期性占空循环；
- 交互式紧密调度；
- 交互式基于时间框架工作。

监控类的设备被列为“常开”的组。周期性占空循环工作的设备组的一个例子是空调系统，它周期性地自启动来测量温度并根据房间的状态自动打开或关闭制冷与加热功能。交互式紧密调度类的设备举例来说有房间灯、电视机、计算机等，用户期望它们能立即完全工作以及立即完全关断。洗碗机或洗衣机可以被分到交互式基于时间框架工作的类别中，它们是由用户启动的，但启动后并不意

意味着它们需要立即运转起来。它们可以依据电价（即电网的负荷状况）自动调度过一段时间再运行，唯一的约束是它们完成工作的截止时间。例如用户在下班后（比如 17:00）将衣服放到洗衣机里并打开电源开关，对用户来说衣服在早上 8:00 之前洗干净是没问题的。洗衣机将因此来自行决定在 17:00 ~ 8:00 何时进行高耗电量的工作（将水加热和进行洗涤），结果是例如 1h 的洗衣工作时间可能出现在 17:00 ~ 7:00 的合适的时间。

开发嵌入式系统来管理楼内能源使用，需要考虑的关键因素是楼内居民。原因是居民（或用户）可以极大地影响周期运行设备的运行占空比，或者交互式触发电设备内部的各种用电状态（睡眠模式、中等活动、高度活跃周期等）。因此在一个建筑内部的电力消耗场景与随机过程高度相似，在进行电力管理场景评估时不容忽视。

在考虑建筑的温度结构时尤其要考虑加热与制冷，这一点极为重要。建筑的混凝土结构使得其能够存储热能，在确定空调设备的尺寸和运行周期时需要考虑这一效应。例如在冬天，当电力或燃气在某个时段相对便宜时（因此在那个时段能源的价格低），建筑可以加热到比所需的温度再高出少许，假设用户需要室内温度为夜间 24℃，白天 18℃（上班时间），供暖系统也许会考虑在下午晚些时就把温度加热到约 25℃，以此来避免晚上用电高峰的高电价。这是可以做到的，因为墙体可以保持住这些“额外的”热能，在晚上时就可以少加热。

就目前为止的讨论，外部环境也很重要，原因在于所考虑的几何构成中（如一间公寓）外部环境不受用电器的影响。例如相邻公寓的制热会将热能存储在其间的墙体中，因此会对我们所关注的那间公寓的制热提供帮助。相反，如果相邻公寓非常冰冷，那所关注的那间公寓就要比通常多制热一些。

2.1 对公寓或建筑物仿真

本节讨论如何对公寓或建筑物进行仿真。这里所描述的方法是基于后面将要描述的对无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）进行高层次模拟所获得的经验。其基本思想是将公寓看作大型的网络，系统中的每个执行机构代表一个节点，并且像 WSN 一样，在所有节点（或其中一部分节点）间存在信息流。经由通信信道所传输的信息有：各执行机构当前的活动状态，当前电力消耗水平，如果可能的话还有基于历史（剖析）数据对未来电力消耗的预测。活动状态举例如下：

- 居民打开电灯；
- 冰箱达到阈值温度需要启动制冷；
- 居民打开冰箱的门；
- 硬盘存储器开始录下电视节目；
- 洗衣机开始工作。

出于日志目的,使用一个中央模块来记录总体的以及各设备的用电情况。环境温度也是通过中央模块来进行管理的,温度模块从窗户(外部环境信息)、加热和制冷系统来获取信息,而冰箱则接收温度变化通知或者查询当前温度来更新其内部温度状态以便用户打开冰箱门的时候作出相应的反应。

为了便于后续的细化,这里的高层次仿真使用 SystemC^[2]来编写,其中虚拟通信部分使用事务级建模(Transaction Level Modelling, TLM)。对于电器则可被看作模拟混合信号(Analog – Mixed – Signal, AMS)系统的虚拟(温度)存储设备,可以使用 Accellera 标准组织(前身为 OSCI)的 SystemC – AMS 扩展^[3]。出于使用方便,全局单体电力与温度跟踪模块用 TLM^[4]多端口目标实现,对于数据更新回虚拟网络的分配操作使用 TLM 启动器实现。

3 精化建模与应用场景

通过对智能的配备功率监控的电器与其环境交互的各应用场景的模拟与评估,可以得到通信协议所需的优化参数(允许或估计的时延等)。接下来的事情就是设计并将嵌入式系统集成到智能电器中,为此必须对建模进行细化。例如高层建模仿真中的部分抽象通信从硬件来说可以使用网络通信来代替,另一些抽象通信在它们表示为用户交互或者环境测量数据时仍保持为抽象的。网络通信的实现可以是使用空中信道通信的 WSN 或者是由电缆铺设的网络。抽象的电器则被细化为连接到传感器节点的传感器与执行器。

3.1 节点内建模与精化

作为第一步,各种节点被建模并精化为准确硬件模型(见图 3.2),可按如下步骤实现:

- 1) 将核心部分建模为虚拟状态机;
- 2) 将微控制器建模为指令集仿真器 (Instruction Set Simulation, ISS);
- 3) 传感器精确建模;
- 4) 执行器精确建模;
- 5) 将微控制器建模为硬件系统;
- 6) 收发器精确建模。

在进行软件开发的同时,可以对(传感器)节点与外界的接口进行建模,还可以并行地考察现有传感器种类的设计空间。在与“真实”固件相关的方面,是时候来优化节点本身以提高功率效率了。SystemC 和配备各种事务模型的 TLM 可以使设计者完成多层级的仿真工作,因为各组件都是通过可被看作内存映射类的片上系统总线的 TLM 互连来实现连接的。

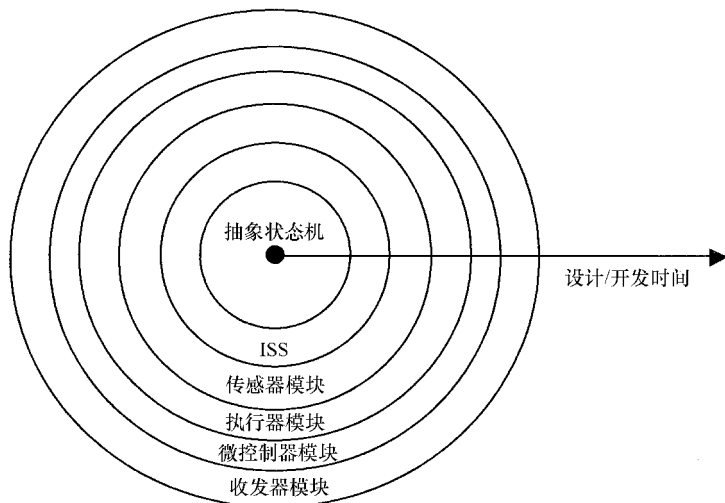


图 3.2 节点的设计与仿真由内而外的建模步骤（尤其是使用 ISS 作为中间一步，它的优点是可使将来跑在节点上的真实固件可以很早期地开发、测试与评估。这会使硬件、软件联合设计变得简单。ISS 比完全仿真各节点的硬件要快，因此可对大型网络进行有效仿真，在大部分情况下，编写时限宽松的甚至是模拟运行周期与真实硬件精确匹配的 ISS 都要比设计整个微控制器硬件部分容易且快速，尤其是当定制的微控制器刚刚开发，相应的第三方模块都还没有到位的情况下。最重要的事情就是仿真的速度。关于本主题进一步的信息请参阅文献 [5-7]）。

3.2 WSN 建模与仿真

构建自动化以及设计能源管理所需的具备电力感知的嵌入式系统，一个重要的部分就是各种分布式组件间的通信。在设计阶段，需要在很早的时间点就要对可能的通信协议进行鲁棒性与容错性的评估，这会使设计人员有效地选择最适合该任务的通信协议。需要考虑的事情如下：

- 拓扑结构；
- 节点失效的容忍度；
- 能耗；
- 外部干扰的应对。

考虑这些问题需要对大量的节点进行仿真，使各种各样的独立网络共享同一通信信道（空中信道）。对于有众多节点的大型（甚至是巨型）网络，对所有的通信都按照波形与干扰那样进行仿真是不切实际的。一个叫 SNOPS 的项目证实了将无线通信抽象为一个个的事务比较可行。这种方法与 TLM 对基于总线的通信进行抽象的方法很像，总线不会被看作单独的数据线，而是用来传输事务的（见图 3.3）。

WSN 中不同的是，接收事务的不是单一的目标，而是某个几何区域内的所有节点，因此事务会被分割，路由也会变得更加复杂^[8]（见图 3.4）。

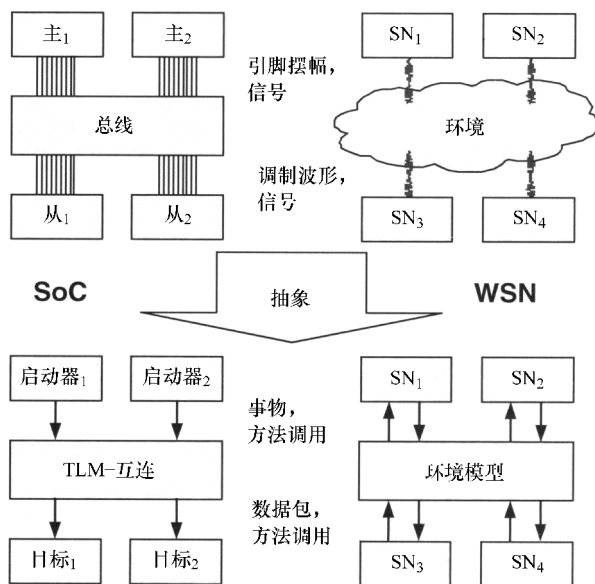


图 3.3 数据线抽象为基于总线的通信, 调制的波形抽象为基于无线通信的事物

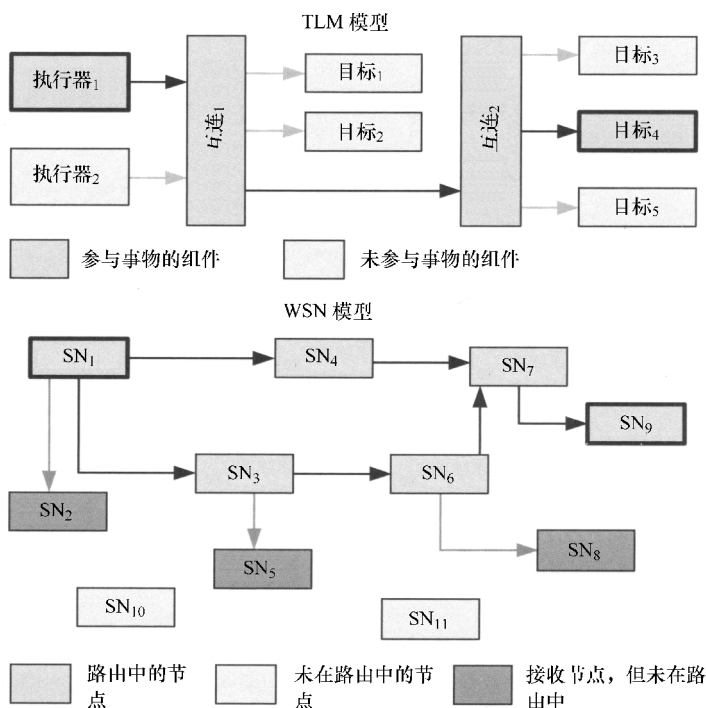


图 3.4 事务分割, TLM 与 WSN 模型的不同点之一

从本质上说，WSN 可以被建模为会产生通信错误的总线。通信错误可以是完全的数据丢失（例如路由节点中断），或者是比特误码。比特误码是由接收节点侧较差的信噪比（Signal - to - Noise Ratios, SNR）带来的。基本来说，事务是以下集合：

- 传输的数据；
- 传输开始；
- 传输结束；
- 发送者位置 (x, y, z) ；
- 发送能量。

基于图 3.5 所示的数据参数集，可以得到 SNR 进而计算出比特误码率。

WSN 使用的这种 TLM 方案提升了仿真的性能，因为少了很多数学运算模块，使得对协议的评估变得容易。在设计的过程中波形仿真可以在后来加上，但到那时仿真大型网络就不再可行了。在最后的精细化阶段，网络中只有更小的部分能够仿真了。

功率扩展		空中扩展			事物主体内容
累计功率	节点	第一次	第二次	...	数据
	4	参数	参数	参数	
	2	参数			
	7	参数	参数		
	12	参数			

图 3.5 使用 TLM 通用净负荷扩展协议在净负荷前添加元信息

4 ESL 仿真

在 SmartCoDe 项目中，控制家用电器能源需求的软件与硬件都已完成设计和实现。

在项目的早期阶段，为了探索硬件与软件方面不同的设计方案以及验证系统需求的满足情况（见图 3.6），制定了具体的规格说明书。在 SmartCoDe 项目中设计了一种可集成到智能电器（例如可进行能源管理的冰箱）中的微电子平台，它是一个有如下任务需要实现的节点：

- 监控它所嵌入的电器的运行情况和电力消耗，以及与之相关的环境条件（温度、光线等）；
- 控制电器的运行状态（开、关、待机等）；

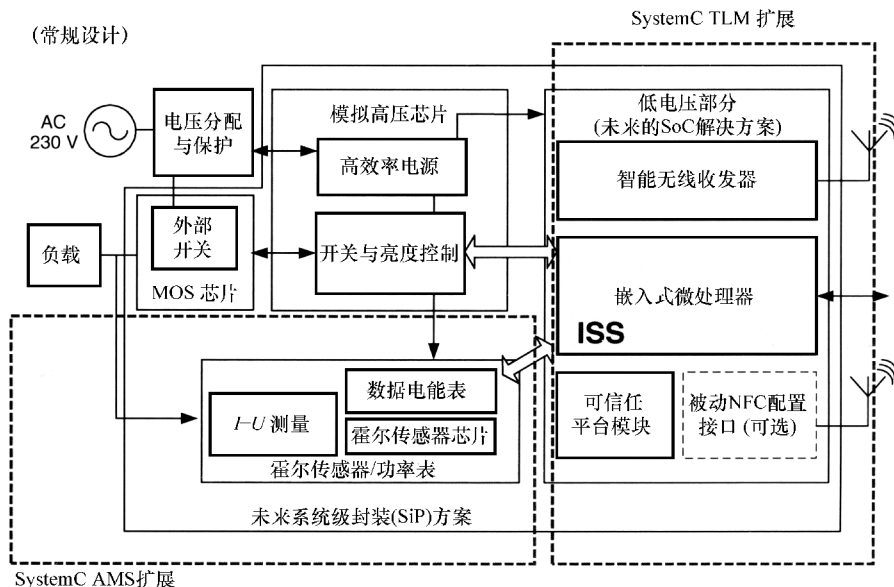


图 3.6 对能源管理所用的微电子平台进行仿真的具体配置（环境也由 SystemC 来仿真）

- 智能地与能源管理系统进行信息的发送与接收。

为了将规格说明书转换为系统的功能模块，不仅仅是硬件和软件需要建模，还要包括网络和一些环境变量。为了在单一的模拟环境中对以上各方面进行建模，该项目选择了 SystemC。进一步，应用了 SystemC 扩展 TLM 2.0 和 SystemC - AMS 来对通信和模拟电路的工作作用抽象的方法建模。对模型结构的具体描述见参考文献 [9]。

网络的建模是对 WSN 使用 TLM 模型（Moreno 等人），这已由 SNOPS 项目开发完成。在智能电器中关于物理执行过程（例如冰箱的制冷/加热）快速与精确的模型，同时考虑到例如室温等其他参数的模型，是由 SystemC - AMS 扩展来创建的。从而 SmartCoDe 规格说明书讲述了由对系统非常抽象的模型开始的嵌入式的系统级设计。在细化之后，通过对本地节点架构以及它所处的环境与整个网络的行为进行建模，同一个模型可被用于分析各种能源管理的方案、算法、策略。在后面的阶段模型中加入更多细节，例如真实的 ZigBee MAC 和路由协议，关于环境条件变化的更接近现实的模型等，从而可以进行系统级验证。

5 小结与展望

建模所用的方法都已开发完成并使用在 SNOPS（WSN）、GreenHOME（建筑与街区的仿真）以及 SmartCoDe [电子系统级（Electronic System Level, ESL）]

等项目中。这些项目成功地使用了仿真来确定本地网络的参数以及分析在单独的建筑物内的能源管理。

图 3.7 展示了智能冰箱固件的分析过程，所模拟的场景可以帮助人们开发与优化智能电器中的软件，同时还考虑到了对整座建筑的优化。

然而，目前还没有实现在一个分布式模拟环境中来模拟整条道路或者是街区，仅仅是单个的公寓或者是内部有几间公寓的楼房实现了仿真。计划中的将来是增加分布式环境模拟这一功能，并且将那些有共同基线但已开始互相偏离的方法进行整合，回到一个单一的大型框架下面来模拟建筑物并且一直精化到硬件层次。

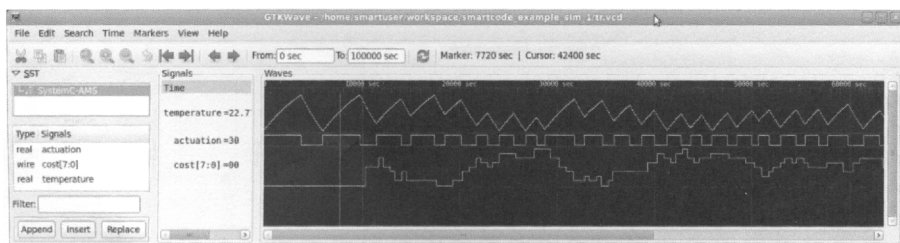


图 3.7 对智能冰箱进行仿真的示例结果

致谢

上述部分内容是由能源模拟（SNOPS）项目所进行的传感器网络优化工作的一部分，该项目是由奥地利政府通过 FIT – IT（许可号 815069/13511）作为欧洲 ITEA2 GEODES 项目（许可号 07013）的一部分来资助的。更进一步的工作是由 SmartCoDe 项目，联合欧洲委员会第七项目框架（FP7/2007 – 2013）许可协议号 247473 以及 GreenHOME（电网能源效率共同责任网络化家庭）研究项目共同资助的，后者是由奥地利政府以及维也纳市在 COMET 能力中心计划框架下赞助的。

参考文献

1. Damm, M., Mahlknecht, S., Grimm, C., Bertényi, T., Young, T., & Wysoudil, C. (2011). A partially decentralised forecast-based Demand-Side-Management approach. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2011 I.E. PES.*
2. OSCI (2007). Accellera, Open SystemC Initiative, SystemC <http://www.systemc.org> <http://www.accellera.org/downloads/standards/systemc>
3. OSCI (2010). Accellera, Open SystemC Initiative, SystemC AMS v1.0, <http://www.accellera.org/downloads/standards/systemc>, <http://www.systemc-ams.org/>

4. OSCI (2009). Accellera, Open SystemC Initiative, TLM 2.0.1 <http://www.accellera.org/downloads/standards/systemc> http://www.accellera.org/members/download_files/check_file?agreement=tlm_2-0_lrm
5. Lang, M., Haase, J., & Wenninger, J. (2011). Distributed Multi-Level Simulation of Wireless Sensor Networks. *ARCS 2011 Workshop Proceedings*. Como.
6. Wenninger, J., Moreno, J., & Haase, J. (2011). Power optimization of wireless sensor networks. *IEEE AFRICON 2011*. Zambia.
7. Wenninger, J., Moreno, J., Haase, J., & Grimm, C. (2011). Designing Low-Power Wireless Sensor Networks. *FdL – Proceedings of the 2011 Forum on Specification & Design Language*. Oldenburg.
8. Wenninger, J., Damm, M., Moreno, J., Haase, J., & Grimm, C. (2010). Multilevel Sensor Node Simulation within a TLM-like Network Simulation Framework. *ARCS'11 Workshop Proceedings*. Hannover.
9. Moreno, J., Wenninger, J., Haase, J., & Grimm, C. (2011). Energy profiling technique for network-level energy optimization. *IEEE AFRICON 2011*, (S. 1–6). Zambia.

第 4 章 建筑自动化所需的无线网络通信标准

Jan Haase

1 简介

选择合适的无线网络标准正变得是一个挑战，因为有非常多的标准在很多情况下是很相似的。将这些网络标准进行细致的比较是一项很耗时的任务。无线网络标准都是依据不同的应用来设计的，例如工业监控、卫生保健、家用自动化或者门禁报警系统等。每一种应用对通信系统都有不同的需求：有一些需要非常低的时延，而另一些则非常讲究安全，或者是非常快速的连接，或者是很长的电池寿命。

第 2 节会对各无线网络标准进行综述，之后在第 3 节介绍一些无线网络典型应用，在对给定场景的无线通信协议进行比较之前，会根据该场景的最重要的属性进行预选。本章的简短的版本已出版，见参考文献 [1]。

2 各协议标准概述

本节对现有的成熟的 WSN 协议和它们的物理层属性进行概述。如果某协议有额外的特性或局限，本节也会将它们列出。

2.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 标准^[2]定义了物理层和媒体接入控制（MAC）层。很多流行的 WSN 协议都是基于这一 IEEE 标准的。该标准的射频传输工作在 ISM 频段（工业、科学与医疗），ISM 频段在不同的地区所用的频率会不同。该标准在 ISM 频段所使用的频率和限定条件如下：

- 868 ~ 868.6MHz（欧洲）；
- 902 ~ 928MHz（北美）；
- 2400 ~ 2483.5MHz（全球）；
- 3100 ~ 10600MHz [超宽频（UWB），各地区不同]。

IEEE 802.15.4 标准详细说明了物理层和 MAC 层的无线网络通信最重要的属性，例如频率范围、传输速率和调制方式。该规范现有不同的版本，即 802.15.4^[2]，802.15.4-2006^[3]，802.15.4a-2007^[4]，其中的 IEEE 802.15.4

标准又被广泛称作 802.15.4-2003。IEEE 802.15.4 与 IEEE 802.15.4-2006 的主要区别是后者添加了 ASK 与 O-QPSK 调制方式,使得在较低的频率上实现更高的传输速率。选择该标准的一个理由是它在与其它网络共存方面做了一些工作,尤其是对于 2.4GHz 频段以及 802.11 标准。

虽然都是在 ISM 频段内,具体的频率、调制方式和传输速率在各地区不同:

- 868 ~ 868.6MHz, BPSK, 20kbit/s;
- 868 ~ 868.6MHz, ASK, 250kbit/s (802.15.4-2006);
- 868 ~ 868.6MHz, O-QPSK, 250kbit/s (802.15.4-2006);
- 902 ~ 928MHz, BPSK, 40kbit/s;
- 902 ~ 928MHz, ASK, 250kbit/s (802.15.4-2006);
- 902 ~ 928MHz, O-QPSK, 250kbit/s (802.15.4-2006);
- 2400 ~ 2483.5MHz, O-QPSK, 250kbit/s。

IEEE 802.15.4a 标准是 IEEE 802.15.4 的补充,在 ISM 频段中增加了几个频点,并且在 2.45GHz 频点中增加了调制方式。UWB 在三个 UWB 频段中使用了 16 个通道,分别是 250 ~ 750MHz、3.244 ~ 4.742GHz 和 5.944 ~ 10.234GHz。不同的区域在 3 ~ 10GHz 的免费频段会有所不同。IEEE 802.15.4 标准在 2.4GHz 频段内又增加了互相交叠的 14 个线性调频扩展频谱频道。

2.2 ZigBee

ZigBee^[5]是一种低价、低功耗的 WSN,应用于能源管理与能源效率、卫生保健、家庭与楼宇自动化以及工业自动化领域。ZigBee 协议使用 802.15.4 标准,工作在 2.4GHz 频段,带宽是 250kbit/s。在欧洲和北美还有几种专门为低工作频率优化了的 ZigBee 模型。低至 0.15% 的占空比使得 ZigBee 成为一种低功耗的通信协议,它所在的节点在大部分时间里都处于睡眠模式。网络中最大的节点数是 1024,信号范围可达 200m。还有一些 ZigBee 模块的信号范围可以超过 1000m,它们工作在 10mW 的最大允许发射功率下。ZigBee 可以使用 128bit AES 加密。

2.3 6LoWPAN

6LoWPAN 是“低功耗无线个域网 IPv6 传输”的缩略语,这种协议的设计用途是能源管理、家庭与楼宇自动化。它仅工作在 2.4GHz 频段,传输速率是 250kbit/s。6LoWPAN 没有加密的定义,信号范围是 200m,每个网络的最大节点数限为 100,这一限制是单个信道的,可以使用有线骨干网连接子网的方式扩充。

2.4 无线 HART

无线 HART (Wireless HART)^[6]是一种用于流程监控与规范化的工业标准。它基于 IEEE 802.15.4-2006 标准,使用 2.4GHz 附近的免费频带,它使用跳频技术来对抗其他应用的干扰,对质量差的信道使用黑名单,并且在具有挑战性的

环境中达到高可靠性。它的信号范围是 250m, 使用 128bit AES 加密。

2.5 ISA 100

ISA 100^[7]也基于 IEEE 802.15.4-2006 标准, 仅仅使用 2.4GHz 频带, 使用跳频技术来对抗其他无线网络的干扰, ISA 100 的主要应用是工业自动化。它的一个重要的属性是低时延或者是低至 100ms 的快速响应。ISA 100 具有与很多种无线通信协议互操作的能力, 包括 HART、Profibus、Foundation Fieldbus 和 Device Net。

2.6 WiMi

WiMi^[8]的两种标准, 即 WiMi 和 WiMi P2P 都基于 IEEE 802.15.4-2003 协议, 工作在 2.45GHz 频带。这种 WSN 使用 Microchip 公司的专属协议并工作在它们的微控制器上。这种协议被优化为专门传输传感器通信所应用的短信息。WiMi 和 WiMi P2P 的信号范围是室内 125m、室外 550m。通信可用 32bit、64bit 或 128bit 加密。网络的节点数限制是 1024。

2.7 SimplicTI

SimpliciTI^[9]是所有权归德州仪器公司的无线网络协议。它基于 IEEE 802.15.4 标准, 工作在 433MHz、868MHz 以及 915MHz 频段, 传输速率可达 300kbit/s, 信号范围为 100m。

2.8 KNX

KNX^[10]是一种家庭与楼宇自动化的通信系统, 基于国际标准 ISO/IEC14543-3, 欧洲标准 CENELEC EN50090、CEN EN 13321-1、13321-2, 我国标准 GB/Z 20965, 以及 ANSI/ASHRAE 135。它工作在 868.3MHz, 使用移频键控 (FSK) 调制, 传输速率可达 16384kbit/s。

另外还有带有额外电缆插头的 KNX 节点, 可以使不在无线信号范围内的节点实现通信, 或者是在无线信号被障碍物阻塞的情况下通信。该协议是收费的。

2.9 EnOcean

EnOcean 是一种传感器网络, 在欧洲工作在 868MHz, 在北美工作在 315MHz。它的信号传输范围在建筑内可达 30m, 在室外能够到 300m, 信号范围可用中继转发器扩展。使用能量捕获技术的无电池 EnOcean 模块可做到无需维护, 因此可降低其生命周期的成本。EnOcean 在 WSN 能量捕获技术方面具有专利。它不包含加密, 但目前正准备在它们的节点中使用滚动码加密技术。

2.10 Dash7

Dash7^[12]是一种低功耗长距离无线网络技术, 基于 ISO 18000-7 标准, 使用 433.92MHz 射频频点, 传输速率可达 20kbit/s。它的信号范围在 100m ~ 10km 可调, 数据速率在 28 ~ 200kbit/s 可动态调整。该 ISO 标准是收费的。

2.11 WISA

WISA^[13]是“传感器与执行器无线接口”的缩略语,是由ABB公司于2003年开发的。它基于IEEE 802.15.1物理标准,工作在2.4GHz频段,传输速率为1Mbit/s。由于WISA在时间上的确定性,它很适合实时业务,并且它通过跳频对抗其他网络的干扰,使得它的网络行为也具有确定性。它的限制为每小区360个设备,以及每个主节点最多120个设备。WISA有两种系统,可以结合在一起使用,WISA-COM仅使用无线通信,WISA-POWER使用一种类似RFID和防盗系统的射频技术实现通信与供电。

2.12 ANT和ANT+

ANT^[14]是一种无线通信协议与微电子解决方案,专注的领域是运动与健康,但也会应用于家庭与工业自动化以及后勤/货物跟踪。该无线网络工作在2.4GHz频段,协议专门为短包传输进行了优化,但同时也支持速率达20kbit/s的突发传输。每条信道最大支持的设备数为65533,但多条信道可共享同一频带。

2.13 WiMax

WiMax是基于IEEE 802.16^[15],专为无线城域网而设计的。信号范围对于固定站可达50km,对于移动设备为5~15km。WiMax工作在2.5~5.8GHz,传输速率为40Mbit/s。

2.14 ONE-NET

ONE-NET^[16]工作在子G(sub-G)频段,对于欧洲在865~868MHz共有3条信道,对于北美在902~928MHz共有25条信道。传输速率在38.4~230.4kbit/s可调,信号范围在室内为100m,室外可达500m。网络拓扑结构可以为星形、点对点以及多跳。可以使用128bit加密来保护数据安全。ONE-NET网络的最大节点数上限为4096。

2.15 Z-Wave

Z-Wave^[17]专注于无线遥控和家庭自动化,工作在868MHz频段。它的信号范围在其最大传输速率40kbit/s的时候可达30m,网络的最大节点数为232。

2.16 Insteon

Insteon^[18]的工作频段是904MHz,数据速率为13.165kbit/s,突发数据速率为2880bit/s。该协议设备的信号范围为45m视线距离,另外它们可连接到电力线缆进行通信。协议专门为短信息进行优化,使用在家用自动化、报警系统以及门禁控制中。共支持 2^{24} 个ID,设备可被分组,每组最多有256个组员。目前还没有实现加密,但也许很快会加入应用管理密钥或公共密钥算法的滚动码加密。

2.17 蓝牙

蓝牙(Bluetooth)工作在2.4GHz ISM频段,并使用跳频技术。它的数据速

率可达 3Mbit/s, 最大信号范围可达 100m。蓝牙的设计目的是要取代电缆。蓝牙通信使用属性资料, 每种使用蓝牙的应用类型都有自己的属性资料。Wibree 与蓝牙相结合产生了 ULP 蓝牙 (极低功耗蓝牙), 被列入蓝牙标准 Core V4。

2.18 WiFi

WiFi^[20] 作为 WPAN (无线个域网) 目前已经被很好地应用。它基于 IEEE 802.11 标准, 工作在 2.45GHz 频段, 传输速率在 802.11g 协议下可达 54Mbit/s, 在 802.11n 协议下可达 150Mbit/s。

2.19 NFC

NFC^[21] 基于 ISO/IEC 18092: 2004 标准, 使用中心频率为 13.56MHz 的电感耦合器件, 传输速率可达 424kbit/s, 信号范围只有几米, 相比其他 WSN 是距离很短的。

2.20 RuBee

RuBee 基于 IEEE 1902.1^[22] 标准, 用于标签系统。它的信号范围可从几英寸到 50ft, 它的规格满足 MIL STD 810G 标准, 使用的基本频率为 131kHz (2^{17} Hz), 传输速率为 1024Hz (2^{10} Hz)。

3 典型无线应用场景

面对如此众多的无线通信协议, 想要找到某种应用最佳的协议是很耗费时间的东西。经过对无线应用各种需求的提取, 可以将其分类为几种典型的应用场景^[1]。下述各小节列出了一些典型的场景, 并根据所需的主要功能特征从前面所述的各通信协议中做出预选的列表, 该列表可供将来深入研究来选出对指定场景的最适合的协议。

3.1 低功耗传感器

该场景所包括的传感器传送数据的时间间隔非常长, 在间隔期内处于非激活状态, 在这种状态下, 收发器可以切换到最低功耗的工作模式。大部分收发器都提供一种睡眠模式来节省能源, 最适合在传感器非激活期间应用。时间间隔根据不同的应用而不同, 可以从几秒到几分钟甚至几小时。睡眠阶段持续的时间越长, 则该阶段的耗电水平就变得越重要。这些节点可以使用电池供电, 或者是从它们的环境中获取电力 (例如小型太阳能板)。如果节点可以从环境中获取能源, 它的维护成本则与它的电力消耗不相关, 但对于其他的情况尤其是节点需要电池供电时, 能否做到极低的功耗就很重要了, 电池需要成本, 而更换电池所需的人力成本更是远远高于电池成本本身。

在这些场景下, 传输时延和数据速率不是很重要, 允许性能低一些。要把现有全部的网络标准都比较一遍, 数据收集的工作量是非常大的, 因此有必要进行

一下预选，只对收发器的功耗进行对比。传感器所用的微控制器所消耗的功率与微控制器类型和其所工作的频率非常相关。EnOcean 和 Z - Wave 没有提供收发器的功耗，它们所给出的数据都把低耗微控制器的功耗一起算进来了。功耗数据是根据睡眠模式、发送模式和接收模式下所测得的额定电流来计算的。为了接收与发送模式数据对比的一致性，选用的发送输出功率为 0dBm，并使用大信号范围的高灵敏度模式。

由于 IEEE 802. 15. 4 系列各协议都可以使用相同的收发器，表 4. 1 中只用一组数据来代表 IEEE 802. 15. 4 各协议，包括 ZigBee、6LoWPAN、无线 HART、ISA 100 以及专属协议 WiMi 和 SimpliCI。从表 4. 1 中可以看到 IEEE 802. 15. 4 以及 ANT 与 ONE - NET 的收发器有最好的功率效率，其中 IEEE 802. 15. 4 收发器的省电模式最佳。鉴于睡眠持续时间，ONE - NET 和 EnOcean 可以得到比 ANT 方案更好的功耗，如图 4. 1 所示。

表 4. 1 预选的各无线网络能耗对比

协议	睡眠/ μ W	发送/mW	接收/mW
IEEE 802. 15. 4	0. 06	36. 9	34. 8
ANT	1. 80	39. 0	33. 9
ONE - NET	0. 30	63. 0	57. 9
EnOcean	0. 60	99. 0	72. 0
Z - Wave	8. 25	75. 9	120. 0
WiMax	33. 60	224. 0	358. 0
蓝牙	330. 00	215. 0	215. 0
IEEE 802. 11	6600. 00	835. 0	1550. 0

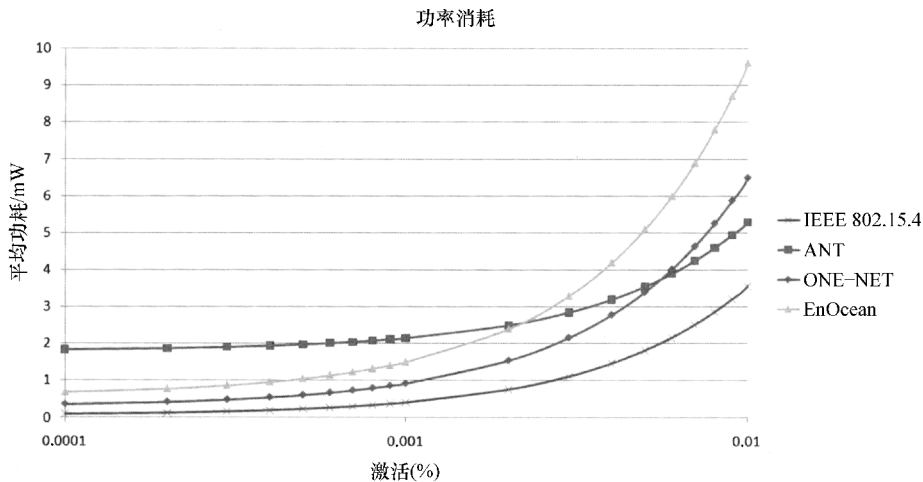


图 4. 1 低功耗传感器协议的平均功耗对比

4 工业应用

对于工业自动化以及流程检测与调控所用的 WSN，最重要的需求是低时延且可靠的通信。当干扰很强以至于数据包需要被重传时，就会产生很长的时延，当干扰的时间更长的情况下数据包甚至无法传送。这会使该无线网络在其他使用相同频率的无线网络协议面前显得很脆弱。大部分 WSN 工作在 ISM 频率的 2.4GHz 频带，因此很有必要找出一种策略来对抗干扰，对于这一需求可以先做一下预选。蓝牙、无线 HART、ISA 100 以及 WISA 都有方法来规避其他网络的干扰。

在预选的无线网络协议列表中，它们都有一个通用的功能来避免干扰，它们都使用跳频技术。这种方法按照已知的顺序规律性地改变频率/频道。另外一个网络仅当它使用某个频道的那一时刻才会对传感器网络造成干扰。

- 无线 HART
 - 跳频；
 - 频点黑名单。
- ISA 100
 - 跳频；
 - 低时延。
- WISA
 - 跳频；
 - 确定行为；
 - 无线供电。
- 蓝牙
 - 跳频。

上述所有的协议都是在工业应用里通常所使用的。它们都使用了跳频技术来尽可能少受其他无线网络干扰，这对于节点间的可靠通信是必要的。这些协议中有一些独特的功能特性，例如无线 HART 所用的黑名单技术，检测到指定的频道上面有太多的噪声则会禁止该频道。ISA 100 具有低时延的特性。WISA 具有无线供电的特性，它可以从传感器附近的供电站所发出的射频信号中提取功率。WISA 由于行为的确定性还适合用作实时处理。依据具体应用所需的功能特性，还需要审查通信所需的其他需求。

4.1 家庭与建筑自动化

建筑自动化需要更大的网络以及在更大的区域内分布节点，因此节点的数量和信号的范围会成为重要的属性。对于大一点的办公建筑来说需要的节点数可能会是几千个，而对于私人公寓的家庭自动化来说所需的节点数不会超过 100。对

于这些场景，在信号范围和网络内的节点数之间需要折中。对于主要的家用和办公应用所需的传感器网络这里做了一下预选。

在表 4.2 中列出了各无线协议的最大节点数和信号范围。信号范围分室内和室外来给出，室外是指无阻碍的视距传收。对于最大节点数，通常是使用地址长度来表示，各协议是没有限制的，但是当信道利用率很高的时候，性能则会下降。一些网络协议例如 6LoWPAN、Dash7、Insteon 和 WiFi，被设计为可以使用有线协议进行通信以扩展信号范围，或者是使用子网来降低信道利用率。

只有少数几种协议能够处理超过几千个节点，或者是直接处理或者是通过子网。ZigBee、6LoWPAN、EnOcean、Dash7、ONE – NET 和 Insteon 可被用于更大一些的办公建筑自动化，其他的协议则被用于小一些的网络，例如家庭自动化。

表 4.2 不同无线网络的最大设备数以及信号范围的对比

协议	最大设备数	室内信号范围/m	室外信号范围	子网
Dash7	2 ³²	10	10km	是
WiMi	1024	125	550m	
ONE – NET	4096	100	500m	
EnOcean	> 4000	30	300m	
Z – Wave	2 ³²	30	300m	
IEEE 802. 11n	2 ³²	70	250m	是
ZigBee	1024	30	200m	
6LoWPAN	100	30	200m	是
IEEE 802. 11g	2 ³²	40	140m	是
蓝牙	2 ¹⁶	10	100m	
Insteon	2 ²⁴	n/a	45m	是

4.2 数据传输速率

无线通信协议还可被用于替代数据电缆，在这种情况下数据传输速率就会很重要，而信号范围可以为几米甚至是几厘米。多媒体环境就是这种场景的一个例子，几个设备需要高速率传输，如车载或家用影音系统。多媒体无线协议关注于这一场景，需要短距离但是高速率传输，以便可以处理音频与视频数据流。表 4.3 依据高数据带宽给出了预选结果，为了与传感器网络对比，IEEE 802. 15. 4 标准被选为 WSN 的参考，它工作在低信号传输速率和低信号范围。

表 4.3 各无线网络协议的数据传输速率和信号范围对比

协议	数据传输速率	范围
IEEE 802. 15. 3a	480Mbit/s	3m
IEEE 802. 11n	150Mbit/s	70m
IEEE 802. 11g	54Mbit/s	40m
WiMax	40Mbit/s	15km
蓝牙	24Mbit/s	10m
IEEE 802. 15. 4	250kbit/s	30m

在数据传输速率、信号范围和功耗方面始终都要有一个折中。图 4.2 列出了几种协议，对于 WSN 只提到了 IEEE 802.15.4，因为大部分类似的协议都是基于该标准并工作于低信号范围和低传输速率。WiMax、WiFi (n 和 g) 和 IEEE 802.15.3a 与 WSN 及蓝牙相比——它们被设计为低功耗网络——在更高带宽的情况下需要更大的功耗。在图 4.2 中，可以看到低功耗网络还有高带宽网络都在为信号范围和数据传输速率进行折中。依赖于具体的环境，无线网络无法既工作在满带宽又工作在满信号范围，所以大部分协议都支持低一些的数据传输速率来扩展它们的信号范围。

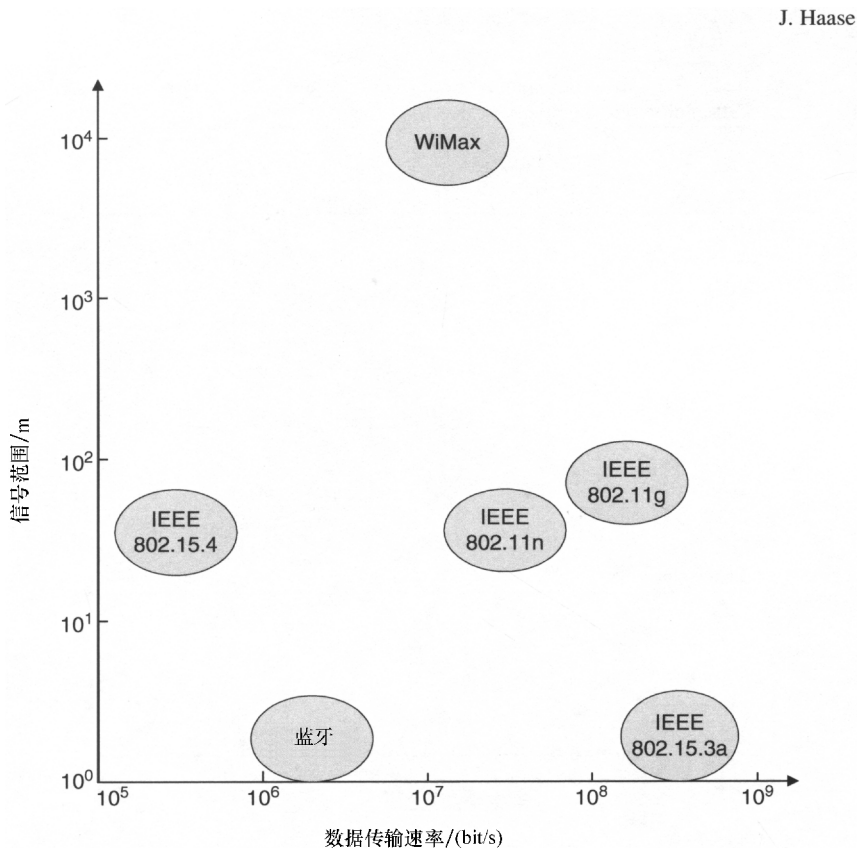


图 4.2 各无线网络协议数据传输速率与信号范围的对比

5 小结

本章列出了三种典型的应用场景，每一种都选出了最适用的无线协议。然而正如很多场景都不会跟所列出的场景完全匹配，很有必要再做进一步的研究以发

现对于给定的需求最适合的协议。

有一些可比较的属性会相对容易找出某个场景最适合的协议，例如功耗或者是传输速率，然而其他一些场景则需要用户通过数据传输速率与信号范围的折中来找出最适合的协议。

为某个应用找出适合的协议，本书只给出了大概的方法。“最好的无线协议”实际上是不存在的，因为它们对环境、上下文和规格的依赖太大了。

参 考 文 献

1. Klaus Gravogl, Jan Haase, and Christoph Grimm: *Choosing the best wireless protocol for typical applications*. Proceedings of International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS) Workshops, 2011 23rd, ISBN: 978-3-8007-3333-0; S. 279–284.
2. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE 802.15.4-2003, 2003.
3. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE 802.15.4b-2006, 2006.
4. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE 802.15.4a-2007, 2007.
5. Zigbee rf4ce specification version 1.00. Website. <http://www.zigbee.org>.
6. HART Communication Foundation (HCF): *WirelessHART Communication Standard. HART 7.0 Specifications*, 2007.
7. ISA100.11a Working Group: *ISA100.11a Draft Standard release 1*, 2007.
8. Microchip. <http://www.microchip.com>.
9. Texas Instruments: *AN069 Low Cost, Long Range One Way Audio Communications at 900 MHz*.
10. KNX. <http://www.knx.org>.
11. EnOcean: *Wireless sensor solution for home & building automation – the successful standard uses energy harvesting*, 2007. <http://www.enocean.com>.
12. Dash7 Alliance. <http://www.dash7.org>.
13. ABB: *Introduction to WISA*, 2006. <http://www.abb.com>.
14. Nordic Semiconductor: *nRF 24AP2, Single-chip ANT ultra-low power wireless network solution*, 2009.
15. *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE 802.16, 2002.
16. ONE NET. <http://www.one-net.info>.
17. Zensys. *Z-Wave Protocol Overview*, 2006.
18. Smarhome Technology. *Insteon – The Details*, August 11, 2005. <http://www.insteon.net>.
19. Bluetooth SIG. *Bluetooth, Covered Core Package version: 4.0*, 2009. <http://www.bluetooth.org>.
20. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE 802.11, 1997.
21. *Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Near Field Communication – Interface and Protocol (NFCIP-1)*, ISO/IEC 18092, 2004.
22. *IEEE Standard for Long Wavelength Wireless Network Protocol*, IEEE Standard 1902.1-2009, 2009.

第 5 章 智能嵌入式电器网络的安全

Edgar Holleis

1 简介

怎样才能设计一个系统有足够好的安全性？怎样才能通过暴露系统安全性的实验来评估系统和产品的安全性？不够成熟的做法是将设计结果与众所周知的安全标准进行比较并同时考虑需求与成本。这种方法当比较机械器具例如各种锁头的时候还算有效，可是当想决定要不要增加加密长度或者是增加芯片内的干预电阻以此来增加安全性时，问题就不那么简单了。

在智能嵌入式系统里的安全问题要比加密学的算法和协议的范围更大。具体来说安全性包含如下原则：

安全性不只是一种功能同时也关于流程和人。刚接触这一领域的人倾向于花大量的精力来关心功能（加密长度、干扰电阻、协议支持），而没有理解到功能并不能保证安全。流程方面有生产制造、安装与维护，人的方面有用户、所有者、设备供应商和维修技师。过于严苛的密码策略（要求经常修改）则可能会减弱安全性，例如当人们把密码都写在便利贴上时。

安全需要折中。安全方面的考虑会影响到成本、方便性、系统复杂度以及人们的印象和感知。安全系统的失效是因为相应的措施在更紧急的事物面前被妥协了。例如某个产品偏好后向兼容，支持老的产品而新产品已采用严苛的新安全协议，这会使产品容易遭受降级攻击，攻击者会把自己伪装成一个使用老的低安全版本的用户。后向兼容在一定程度上还是可以接受的，具体要看保护什么和针对何种攻击者。

折中是主观的。结果的安全性是好的还是差在很大程度上取决于做出折中决定的个人或组织是否会对导致系统最终被攻破的破坏行为负起责任。规范和标准会起作用，但是最终的成功还是取决于对规范遵守的诚实度，例如，组织不仅需要遵守字面上的规范，还要尊重其本意。

安全问题有其最薄弱的一环。如果没有合适的方法来将密码载入嵌入式电器，“128bit AES 支持”也是毫无意义的，如果密钥空间很有限或者是密钥在空中接口明文传送，那么攻击者无需攻破 AES。

安全系统需要防御深度。假设安全系统单一的每层都可以被攻克。举例来

说，房屋的主人他们不仅仅依赖法律的力量来保护他们的财产，他们可能会使用经安全加固的门和窗，如果他们去度假他们可能会请他们的邻居帮助检查他们的家。同样的，在智能嵌入式电器网络中将非授权的节点拒之在网络之外而不是安全系统边缘就很重要。攻击者可能会将网络中某个已有的节点盗用，然后使他按照自己的意愿发送任意的命令。通过检查某个具体的节点是否被授权发送某个具体的命令这种方法可以挫败他的努力。提高物理节点的安全性也会使攻击增加难度。

安全的属性不是非此即彼。系统对于某种攻击可能是更安全或者是不太安全的，关乎到攻击者他或她的目标、能力、所选择的策略与动机。因此讨论某种安全功能的优点时，只能在他面对某种具体的攻击模型时才有意义。

安全系统随着科技的更新而变化。新科技可能会对攻击者有好处，也可能是对防御者或两者都是。技术的或社会的革新还会改变系统运行的上下文环境，从而将系统暴露给未预测的攻击，使得原先的安全系统被淘汰。

第2节讨论对系统的攻击并与因特网的攻击进行类比，第3节简短介绍了加密技术和在智能嵌入式系统环境下加密技术的挑战，第4节介绍了在现实中系统是如何被攻破的以及在加密技术之外还有什么需要注意的。

2 智能嵌入式电器网络所面对的攻击

既然大部分电器都还很新并且目前还只是在想象未来的电器，所以预测未来智能嵌入式电器所面临的全部攻击是不太可能的。下面几个段落给出的是以攻击者为中心的攻击模型，它们对攻击者、他或她的动机以及与攻击目标的关系、攻击所用的工具还有攻击矢量进行了分析。

从攻击动机开始，攻击者可能发起攻击的原因如下：

- 为个人目的，窃取财产或信息；
- 为了带来损失，例如拒绝服务、蓄意破坏、敲诈勒索或网络战争；
- 为了炫耀和知名度，例如黑客主义；
- 为了他或她自己的设备（硬件或软件）安插到网络中，利用被盗的网络设施（僵尸网络）来为第三方提供服务；
- 为了将信息植入网络来对某人栽赃。

对攻击目标的选择，攻击者可能会感兴趣的如下：

- 某种特别的设施或系统；
- 与攻击者的偏好相匹配的任何设施或系统（所考虑的系统可能是用“扫描”、“网络钓鱼”或“驱动战争”等方法所发现的）。

在一个娴熟的并且资源丰富的攻击者面前，当他的攻击属于上述第一类情况

时，就是专门对特定的系统感兴趣，这时是很难对系统进行防御的。这种问题的技术术语被称为“高级持续性威胁”。如果你可能成为目标，为了保护你的网络则需要恰当的监控、检测与作出反应的能力。由于本节的目的不是关于如何建立网络运营中心，而是基础介绍，本节剩下的部分会关注对于网络平时多见的威胁。

攻击矢量可能会有：

- 因特网本身，如果智能电器网络与之连接的话；
- 无线信道，或电力线缆通信频道；
- 对网络所信任的设备的物理操作；
- 用服人员，以及其他取得信任的内线（包括业主）；
- 伪装的或具有蓄意破坏目的的应用程序更新。

无法穷举未来攻击者所有可能的目标，以下只列出了一部分：

- 把智能电器网络作为矢量来攻击其他一些目标（因特网连接、智能手机、家用计算机、例如 Email 等网络账户）；
- 开锁或偷车；
- 攻击智能电表来减少电费账单（攻击者是付费用户），或者是把自己的电费账单转到别人头上（攻击者是邻居）；
- 攻击那些可以带来退费的电器，为了窃取财物凭据或对先前盗窃过的财物凭据进行套现（智能冰箱、辅助生存的机器人等）；
- 侵犯隐私，以获取行为特征（犯罪、私家调查、法律强制执行）或者研究你家里的电器来确定是否有必要对你家进行入室盗窃；
- 规避家长控制，或摆脱数码约束管理（“越狱”或获取设备“root 权限”）。

基于上面的描述，可以对包括攻击者的处理方法在内的行为特征进行理论化。做出以攻击者为中心的威胁模型，在后面会被用到：

- 1) 技术熟练的黑客或一组黑客意图入侵和/或躲避控制；
- 2) “脚本小子”（还不熟练的未来黑客，能够在网上下载并运行恶意软件）意图有意毁坏、侵犯隐私和/或躲避控制；
- 3) 有组织的网络罪犯，试图将他们的犯罪行为变现（变卖财务凭据、敲诈、发送垃圾邮件等），只要能获益就无所不攻击。

为与本书整体的主题一致，假定所有的智能电器都已是广泛使用的，并会提供令人兴奋的应用。依据这个假定，罪犯们很可能会想出各种奇特的办法来通过受攻击的网络赚钱，就像他们在因特网上所从事的犯罪行为一样。它们会带着广泛的技能、人力以及资源来交易攻击所得或窃取的信息，就好像过去人们破坏机顶盒来设法观看更多的免费电视频道，这种事可能会发生在智能电表或者是其他电器上面来窃取更多的服务。

2.1 打补丁

历史表明，很难想象如智能电器网络这样复杂的分布式的系统，可以被开发、销售并广泛使用还能不被人发现弱点并最终加以攻击利用。

事实上这已经发生过，在波多黎各，从 2009 年起该国的智能电表系统据称是因为诈骗而损失了数百万美元。由于攻击需要物理篡改，电表生产商的前雇员从中发挥了作用。事件的整个过程一直保密，直到 2012 年初被一家安全相关的媒体披露^①。

有必要认为，找出易受攻击的弱点，打补丁并升级受攻击的组件这样一个循环最终是要建立起来的。开发者和供应商与安全社区（独立研究员，黑客专家）广泛接触是有益的，可以预防可能发生的事件，准备好安全响应流程。忽视或拒绝安全弱点通常会导致公共关系的灾难。

笔者相信，为了智能嵌入式电器网络的安全运营，在整个产品周期内维护的有序、有计划的补丁流程将会是很有必要的。这个流程会有以下两种形式：

- 通过因特网远程下载软件更新并在计划的维护期间安装；
- 在物理层面利用可插接模块进行升级安装。

2.2 无线暴露

无线智能家电网络还有一个缺点，就是如果想要窃听或入侵网络不需要在物理空间上很靠近。如果认为低功耗网络由于信号范围小就不易受攻击，这样想就错了。攻击者和他们的设备可不受低功耗的约束，只要有足够的廉价的和到处存在的天线，攻击者就可以在远距离来操作低功耗网络，如果他们愿意可以在几千米之外。图 5.1 描述了一种简单的廉价的定向天线。

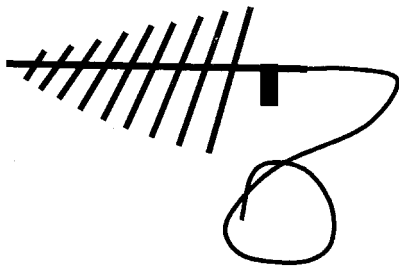


图 5.1 低价的定向天线

同样的原理对电力线缆通信也有效，只是程度低一些。攻击者可不受信号功率规范的约束，它们可以用更高灵敏度的接收器，甚至可以跨越线路滤波器来收发信号。由于电力线缆通信也使用射频频率，并且电力线缆也用作天线的用途，通过无线的方法来窃听电力线缆信号也是可能的^[1]。

不管是电力线缆还是无线通信，都会泄露通信模式（通信的节点数量、发送的定时与频率、不同设备的发送相关性等）给有心监听的人。由于功率约束的存在，随机化或者是隐藏通信模式是不可行的。无线以及电力线缆还很容易被拥塞（拒绝服务型攻击）。

① <http://helse.de/-1517754> (in German)。

这些都是技术上的弱点，是没有指望修复的。如果真的担心因通信模式而引起的信息泄露，就铺设有线电缆吧。

有线与无线通信的另一大区别是关于网络边界的定义。将设备通过接插头接入到一个有线的网络可被看作意图、所有权和信任关系的直接声明。网络的边界被定义为电缆所能到达的范围。把设备接入到网络的人他本意就是想要设备与网络管理进行通信，设备因此被网络信任管理授权来做它自己的事情以及依照指令来进行工作。而无线的家电则没有明确的指示来确定跟哪个网络通信。由于缺少信任，无线家电遇到的第一个网络需要额外的信息来确定所有权——谁可以操作它们以及它们可以信任谁。3.2节概述了业界成熟的解决无线网络所有权的安全手段。

3 密码学

除了法律禁止、监控并做出反应这些手段之外，对通信网络安全进行加强的技术手段就是密码学，它的目标可以总结如下^[2]：

机密性：只有取得授权才能获取信息，对于智能嵌入式电器网络来说信息需要对非授权的实体保密。

完整性：信息在传输的时候不会被未授权的实体篡改，例如“关门”不能被改为“开门”。

可用性：网络能够按照它当初所设计的那样提供服务。对于无线网络（它很容易受干扰）来说它有一个缩减的含义：信息不能未经通知就被损坏。

真实性：对节点实体的真实性给出证明。消息本身就要携带证明来表明发送消息的节点的真实身份。

不可否认：是说有某个实体所发出的行动事后不能否认。任何一条消息都可以唯一地追溯到发送节点，网络的这一属性可用于保证对异常行为（例如被入侵的节点）正确地找到归属。

新鲜度：网络上传输的数据从时间上是精确的，也就是说传感器的数据和命令是与物理现象和期望的时间关联在一起的。它还可以挫败复制攻击，就是攻击者将适合它意图的消息记录下来并在后续他选择的时间进行回放。

前向安全/后向安全：如果一个网络在某个时间点被入侵（例如特殊密钥被人拿到），则不允许在这种情况下推断未来或过去的密钥来维持入侵状态（破坏前向安全），或对先前记录的数据进行解密（破坏后向安全）。

这些目标可以由“加密协议套件”在不同的程度上实现，它们是集成的解决方案，还包含至少具备鉴权服务以及消息安全传送服务的子协议。很多协议包都有生成许可、校验与回收许可的功能用以建立信任链（见后面解释）。基于这些加密服务，通过协议包可以实现密钥与用户管理以及鉴权服务。

常见的协议包有：TLS（前身是 SSL），用于万维网的安全；PGP，一个人们熟知的电子邮件安全包；PKCS 协议包，用在智能卡以及从金融交易到生物护照在内的各种事情；或者是基于 GSM 标准的协议，通过 SIM 卡来保证手机网络的安全。

对于低功耗无线网络，可以用 ZigBee 智能能源^[3]，它包含了一个安全包，在处理客户账单方面表现很好。对于设备厂商来说它所选择的底线是至关重要的！这里所研究的其他协议的安全包则不这么称职，且易受攻击。它们也许在数据不会引发财务问题的情况下对于处理数据来说还够安全。

这些协议包和它们的子协议是通过底层的加密算法来获得安全的，这些算法的实例也会在它们通信对端运行，它们互相交互的消息构成了协议。其中一些需要在线通信，而许可验证当它在离线状态的时候会更有用，因为不需要与协作方在线通信。下面的内容会简短地介绍一下加密概念以及它们是如何保障协议的安全的：

密钥在加密系统中的作用非常大。它们共同的特点是阻止攻击者，除非它们被标为“公共密钥”，这一概念将在后面解释，主要的目的如下：

- 确定身份（能得到密钥就是一种身份证明）；
- 保障通信安全，通常是以一种临时“会话秘钥”的形式，这是通过身份密钥获取的。

一些算法需要密钥具有特殊的形式（例如在 RSA 协议中大型的原语列表），但更多的情况下密钥是从密码（如果涉及人机交互）、随机生成或者是密钥生成协议得到的（在后面解释）。

加密器是对称加密算法，基本上来说它们将明文转换为密文，或者反过来。它们被称做对称是因为加密与解密所用的密钥是一样的，人们所熟知的加密器的例子是 AES 和 DES。

哈希函数（又被称为单向函数或者暗门函数）被用为数字指纹，把数据长度减少为固定的比特流，用以在其他加密运算中进行替换，比较有名的哈希函数有 SHA1 和 MD5。在这种设计下几乎不可能通过数字指纹来恢复原始数据，或是找到重码，也就是使用同一数字指纹的另一组数据。

从算法的角度来看，加密器与哈希函数非常相像，它们都是由简单的转换与代换构成、一遍又一遍地通过密钥来实现。它们通常是由硬件实现，复杂度低、吞吐量高，还很省电。相对安全的密钥长度或哈希函数长度约为 256bit^[5]。

公共密钥算法也被称作非对称加密算法，将密钥分割为可公开的公共部分以及需要保密的私有部分。这种方法的优点在**数字签名**中的表现很明显，签名双方生成了一个私有/公共密钥对并公布公共部分。所生成的签名可以被任何人离线校验而不需要签名双方的参与。比较常见的例子有 RSA、DSA 和 ECC（Elliptic

Curve Cryptography, 椭圆曲线密码体制)。

公共密钥算法相对加密学与哈希函数实现起来会更加困难(需要几十kB的代码),它们属于数学运算而不是简单的转换与代换。例如RSA加密与解密所需的运算量等同于两个大数的指数运算并与第三个大数相模(约1000bit)。非对称算法因此不会直接对数据负载进行加密,而是用在临时会话密钥的协商方面,对数据负载的加密、解密都交给使用会话密钥加密器来完成。

公共密钥算法通常都单独由软件来完成,或者是使用软硬件结合的方法,其中只有少数基本模块是基于硬件的。相对安全的密钥长度约为2048bit(RSA、DSA)或396bit(ECC)^[5]。

许可对于网络节点来说就像身份证与人的关系:一个可信任的第三方许可机构对节点进行身份认证。技术上说许可包括一些ID(如MAC地址)、一个公共密钥以及失效时间,由许可机构对这三者进行授权。许可本身是公共的,例如:

- 节点A想要与节点B通信,它通过网络与节点B联络,为了确定节点B的身份是真实的并且不是一个攻击者,节点A向节点B索取许可。

- 节点A首先检查签名(为此它需要许可机构的公共密钥),然后从中提取节点B的公共密钥。

- 如果节点A信任许可机构没有生成错误许可,并且节点B可以证明它的私有密钥确实属于许可的公共密钥,则节点A可被认为对节点B实现信任。检查节点B是否了解私有密钥是通过密钥认证协议来完成的(见后面所述)。

还有一种可能是节点A不知道对节点B进行授权的许可机构,可是节点B可以提供另外一种许可表明节点B的许可机构是由更高级别的许可机构授权的,这被称作信任链,是很多加密系统的核心。信任链通常是由公司间的商业协议或者是经由国家权力机构来备案的。

同步与异步:设计加密协议包可以单独使用同步算法,还可以使用同步与异步的算法(有时也被称做混合系统)。前者节能效率好一些,但需要更多的和更复杂的消息交互^[6]。只有异步算法支持离线校验,这对于通过各独立许可机构建立完整的信任链是很有帮助的。单纯的同步系统需要签名双方的协作来进行校验,如果目标是与智能电网进行交互^[7],或者是与支付系统交互,异步系统是必须的。如果信任关系是简单的与局部的,那么同步系统就很胜任。

授权与密钥许可协议:网络节点身份认证的核心是密钥,知晓密钥可被认为是身份的证明。在同步的情况下密钥是节点与信任中心共享的或者是如蓝牙那样在互相匹配过的节点之间。在异步的情况下则是关于私有/公共密钥对、密钥许可协议提供双重功能、身份证明以及建立为通信所使用的临时会话密钥等方面,所有这些都不需要通过明文传送秘密信息。

对于密钥许可协议可不像商品广告清单那样容易找到,如果列出一些名字的

话，有以下这些协议：认证 Diffie - Hellman 协议，ECDH（椭圆曲线密码体制）的一种变体，Menezes - Qu - Vanstone（MQV）和它的变体 ECMQV。事实上各种成熟度的加密协议包都是使用 DH 或者 MQA 的变体来生成密钥以及授权的。

纯同步协议包有一个问题：两种常见的同步协议包（蓝牙、GSM）使用的密钥许可协议在 MITM（Man In The Middle attack，中间人攻击）面前是易受攻击的，这将在下面说明。一个相对安全的同步协议包是 Kerberos，微软公司的 Windows 系统将其应用在它的企业级产品的安全系统中。

3.1 MITM

尽管本章并不致力于讨论针对加密协议的具体攻击，但还是深入地介绍一下 MITM，因为要防止 MITM 在系统复杂度不断增长的情况下需要相当大的付出。目前低功耗网络通常还无法对 MITM 免疫，就连一些人们所熟悉的协议如 GSM 也不能做到。

MITM 需要攻击者能够向网络注入仿冒消息，一个 MITM 的协议过程如下：

- 1) 爱丽丝给鲍勃发过去她的公共密钥，鲍勃把他的公共密钥发给爱丽丝；
- 2) 爱丽丝和鲍勃使用对方的公共密钥各自加密了一个口令（随机数字），然后发送出去；
- 3) 爱丽丝和鲍勃使用他们的私有密钥各自对收到的口令进行解密，保存下来，再使用对方的公共密钥重新加密再发送回去；
- 4) 爱丽丝和鲍勃使用他们自己的私有密钥对返回消息进行解密，与他们之前发送的口令进行对比，如果一致则可以证明公共密钥与私有密钥相匹配；
- 5) 既然爱丽丝和鲍勃都知道他们自己的以及对方的口令，把它们加在一起，利用它们的和作为会话密钥。

会话密钥是一个临时共享的秘密，任何对协议进行监听的人都没法去恢复它。对于那些可以注入伪消息的攻击者，它在上述过程的第一步会比较容易用它自己的公共密钥来进行替代，然后分别独立地与爱丽丝和鲍勃完成协议过程。他们两个人看起来是在互相通信，而实际上他们都是在跟攻击者通信，攻击者扮演着对方眼中的角色。

对 MITM 免疫意味着在传送密钥的过程中要比来回发送公共密钥这样的做法更加智能。它通常需要一些信息片段在带外进行交互，也就是说通过主无线通信信道之外的手段。例如某个实体具有存储功能，那就可以做到仅使用一次带外信息交互，比如这个设备第一次被添加到网络的时候，或者是更早，在工厂制造阶段（如果制造商属于信任链的一部分）。

带外信息交换的例子有：当第一次与一个 Wi - Fi 接入点进行关联的时候需要输入 PIN 或者密码；在生产制造阶段安装所谓的根认证，进而在后期使用时可以通过全局信任链进行通信授权，这就是为什么一个网络浏览器可以信任一个网

上银行的站点。其他的方案则需要专门的试机工具，在设备接入到网络之前与设备物理连接。像同步按钮这样的技术对于防护 MITM 还是不够的，因为按下按钮的动作所携带的信息熵值太低，很容易猜测。最新的研究提供了一种方法至少可以检测到带内 MITM 攻击，但它是否能经受得住加密社区的考验还很难说。

既然 MITM 免疫所带来系统复杂度的代价是很大的，并且还需要引入试机阶段以及需要对网络进行维护，大部分低功耗无线协议还是接受了对 MITM 的低防御力。它们另外采用的做法是限制网络初始建立以及维护阶段的对外暴露时间，只要潜在的攻击者在它们想攻击的时候无法触发网络维护，那么这种做法还是安全的。

可是很不幸，触发维护周期还是很容易做到的：例如想办法引起网络拥塞，然后等待维护人员到来，再一直等到维护人员将备件插入到网络进行替换。这当然需要攻击者具有很大的毅力，因此增加了攻击成本。并且攻击者也做不到那么自如地就能欺骗用户点击一个链接而发送大量垃圾邮件。可是如果潜在的收益超过所需的付出（包括被捕的风险），那就可能存在攻击。所以各个有关支付的系统都应小心 MITM，因此要在密钥分发方面多考虑一些问题。

3.2 密钥分发

从算法和协议的角度来看，智能嵌入式电器网络的安全问题或多或少可认为已被解决。密码学已经有了，标准需要固化并被采用，剩下的事交给摩尔定律，现在已随时可以提供价格低廉的硬件。而存在的挑战在于，如何安全地进行密钥分发。图 5.2 通过图形展示了问题。将防 MITM 的密钥分发协议加入产品中意味着超出密码学范围之外的一些工作，它要求在生产制造与试机运行之间的某点要进行带外通信，并且不会干扰业已建立的各行业领域的工作流程。

防 MITM 的网络还需要一个信任中心，或者是使用专门的节点要么保存所有节点所对应的共享密钥（对称方案），要么保存接入网络的所有节点的公共密钥（非对称方案）。严格的自组织网络是不能防 MITM 的，需要每个节点与其他所有节点进行带外信息交换。

对于智能嵌入式网络，通过操作人员输入口令或密码不是一个可行的方案，因为嵌入式电器通常都不会配备可输入口令的人机接口。对于大型的网络这还会带来成本问题，为了确保安全，口令必须足够复杂以防猜测攻击，在大型网络下实现这一点的成本巨大。

对于专业网络，有三个选项：

- 1) 支持带外通信，通过可阅读条码的专用试机工具，或通过电缆连接的附件，或使用 NFC（短距离无线非接触）；
- 2) 通过在网络节点中插入识别卡来实现带外通信，例如智能卡或 SIM 卡；
- 3) 通过一直可以追溯到生产厂家的信任链建立信任，网络成员身份由一个

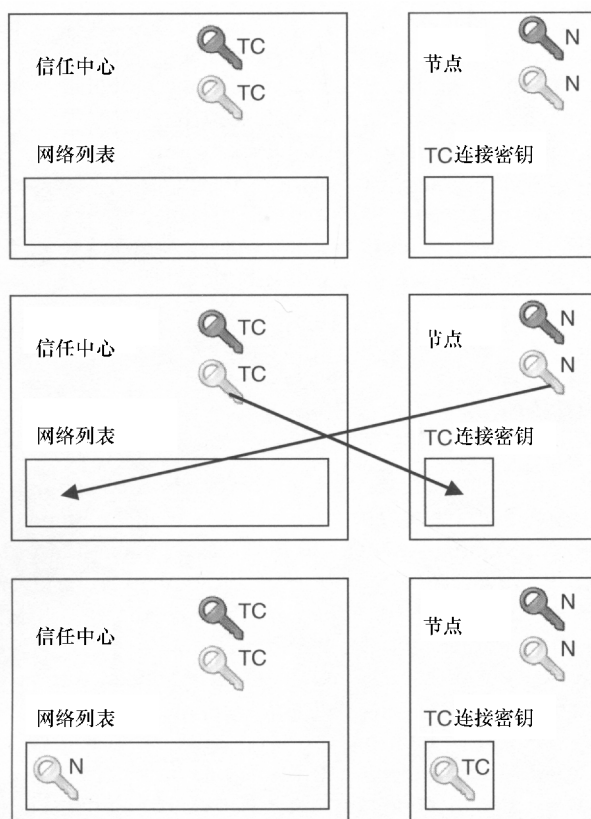


图 5.2 密钥分发问题（非对称情况，私有密钥用深色表示，公共密钥用浅色表示）

将身份许可加载到信任中心的 IT 过程建立。

选项一对于大型专业网络最合适，例如无线建筑自动化网络，该类型网络的优点是使用试机工具极为便利，在设备现场安装的同时就可以完成密钥交换。这也意味着培养不熟练的工人掌握试机工具的使用。

如果试机工具的通信是单向的，例如扫条码，则需要加入一步审核工作。因为扫过条码之后信任中心就可以对节点鉴权，可是节点无法对信任中心鉴权，这就给攻击者留下机会，可以假装是信任中心以此获得对节点的控制。审核工作是确保登记到正确的信任中心的各节点也要对信任中心进行登记。

选项三（信任链）是由 ZigBee 智能能源标准所使用的，它需要 IT 过程一直延续到终端用户。要求用户致电设备供应商，或访问网站来将他们的电器加入到智能能源网络，必要的许可会通过回程网络下载到本地信任中心。

综合的解决方案则需要引入一种方法可扩展适用于不同的市场。同样的密文

原语可被用在不只一种安全设定中，例如在消费者市场中应用同步按钮方案，在商业市场中使用试机工具。在可插接安全卡这一方案基础上延伸出这一想法：智能嵌入式电器的控制器本身就是可插接的，并且可以集成到智能卡中作为其功能的一部分^[9]。这样，不仅可以扩展定制产品的功能集合来适应不同的市场，还可定制像防御破坏性攻击这样的安全性功能。

3.3 安全过程

在这里重申一下在本章简介里提到的概念：关于安全，过程与功能特性同等重要。一个电器是否支持探测密钥的分发并不重要，重要的是调试过程可以完成系统最终的安全部署。这样，那些原本不精于此道的工人突然跃升为信任链的代理角色，如果一个工人仅仅是见到一个穿着制服的人说要“检查一些参数”就把手上的调试工具交给他，那再高级的加密协议也无济于事。智能嵌入式电器网络安全相关的过程如下：

- 生产与物流；
- 安装与调试；
- 使用；
- 维护（更换部件、维护、调试、改装）；
- 从失败的或成功的攻击中恢复；
- 退出运行与处置。

从安全的角度来看，维护过程与初始安装的过程相似，只是它们是由不同的人在不同的时间完成的。如果系统的安全依赖于口令或数字密码，则这两个过程就会关联很紧密，需要当心这些过程完成的时候密码会失效，需要为下一个维护周期生成新的，下一次过程可能会由不同的公司来完成。

用户界面与从用户界面中体现的安全性方面的关系很大，对于操作人员来说他们必须足够丰富，并与相关流程配合得当。如果初始安装的某一步是要求安装人员记录下来 MAC 地址，这一做法就很不可取。

3.4 端到端加、解密

关于密码学讨论最后一个主题是端到端加、解密，就是所有的通信都由此前商定的密钥来保护，这个密钥对通信双方来说是独特的，低安全性的做法是使用共享的全网使用的密钥（网络密钥）。除了 ZigBee 智能能源系统以外，目前的低功耗网络标准都只实现了网络密钥，这样做有很多缺点：

- 前向安全很差：一旦攻击者获取了网络密钥，它将很可能会接收到密钥更新，这样可以持续地入侵网络；
- 无法通过加密技术手段删除一个节点：没有办法迫使一个不合作的节点忘记共享密钥。

实现完全的端到端安全方案的中间过程可以是对各节点与信任中心的通信施

以优先保护。ZigBee 将其称为“信任中心连接密钥”。与网络进行连接时每个节点都要与信任中心运行密钥认可协议，生成密钥的相关信息都由信任中心提供专门路由，因此可以得到特别的保护。其他的信息流仍然使用网络密钥。前向安全从而得到加强，但密钥更新的成本会大大增加，因为再也不能简单地使用广播的方法了。

下一个改进点是对点到点通信也使用单独的密钥。信任中心由于保存了与每个节点的连接密钥，因此最适合由信任中心来分发节点 ID。各节点通过由信任中心来对初始信息交换进行路由而加入到端到端的密钥许可过程。网络密钥仍然可用于广播和例如路由探索这样的低级别的网络维护。这是在当前已有的标准下可以实现的最高安全水平，能做到的有：ZigBee 智能能源以及 Wi-Fi（WPA 企业级）。

再进一步的改进措施则要将网络密钥完全废弃掉，代之以一种“路由密钥”的机制，每个路由器使用自己的本地网络密钥，只跟与之紧邻的网络共享。广播信息在传输的每一跳中在进行再广播之前不仅没进行解密，反而会使用本地路由密钥立即再次加密。单点传送或者可以使用同样的机制，或者可以使用前面提到的端到端加密。阻挡节点也可以实现了，只需对与阻挡节点紧挨着的节点更新它们的路由密钥。问题是，具体实现起来的复杂度太高了，差不多要每个路由器都得配备自己的迷你信任中心。这也许就是为什么各无线协议仍然依靠网络密钥来进行广播的主要原因（另一原因是密钥存储空间的大大增加）。

如前述的密钥分发那样，标准化组织与业界普遍认为只有当被保护的数据足够有价值（例如支付数据）才值得支持端到端加密。当智能电器网络确实得到广泛应用并因此出现在黑客份子和捣乱份子的视野内的时候，倒是可以看看事情会发生什么变化。尽管作者也认可对于不处理支付数据的网络来说，网络犯罪并不是一个问题，但最终那些易于使用的可下载的黑客工具的大量出现对电器制造商来说会带来一系列公共关系问题，并最终成为所有网络的最高级别安全问题。

4 系统是如何被入侵的

第3节专门讨论了密码学，它仍继续为本节的主题，因为系统经常会由于加密保护不当而持续受到入侵。而更重要的是通用的软件安全问题，攻击者都很懒而加密、解密又是一个复杂的问题，所以与其去破解密码他们倒更喜欢在系统具体实现中先找找程序缺陷。

这并不意味着加密标准的健壮性就不重要，相反，加密标准的弱点经常会导致毁灭性的安全漏洞，原因如下：

- 加密学的弱点通常会引起集体攻破,使得整个设备家族易遭受攻击,包括多个供应商的设备以及几代的产品。

- 加密学的弱点尤其难以修复并且很费时间,因为修复工作可能需要修改标准或至少暂时违反产生问题的标准。与其他原因[⊖]一起,解释了为什么一些已发现的 GSM 网络缺陷在很多手机网络中都迟迟没有修复。

以所获得的经验来看,这并不是要随意地去发明新的加密方法,而是尽可能地使用已被广泛证明的技术。即使专业的组织例如 IEEE 偶尔也会犯错误,例如早先的 Wi-Fi 安全标准 WEP,用了很多年才被淘汰掉,已经使很多人遭受损失,包括常见的销售网点攻击,导致成千上万的信用卡卡号被盗。

4.1 针对具体实现的攻击

如果标准是健全的,那其次的最佳选择是针对标准的实现进行攻击。有效的攻击矢量有:边带信道攻击、脉冲干扰(恶意产生电子脉冲来干扰加密处理器)以及针对随机数字生成器的攻击。前两者是很吸引人的论文标题,并且也确实是智能卡和游戏控制器的现实威胁。可是利用它们进行网络攻击的难度很大,因此是退而求其次的选择。

然而,不当的随机数应用,对加密系统来说是一个持续的威胁。看起来问题在于人类基本上无法区分高质量的随机数与差的随机数,也只有通过统计分析才能做到,而这一步常常都会被略过。很多计算机系统都面临一个问题,就是可用的信息熵(随机性)太有限了,所能获得的随机性都是基于外界或是由外界控制。该问题在系统刚启动的时候尤其突出,这也正是密钥许可协议运行需要产生随机数的时候,因此信息熵是由伪随机数字生成器(Pseudo Random Number Generator, PRNG)决定的。该主题的研究众多,相关算法也已成熟,只是它们的具体实现通常会很糟糕,或是它们的内部状态容易泄漏。

针对 PRNG 而进行的攻击有两个著名的例子,一个是 2008 年对伦敦地铁卡(Oyster card)所采用的 MIFARE Classic (M1,一种非接触式射频 IC 卡)无线智能卡的破解,另一个也是 2008 年 Debian Linux 操作系统 OpenSSL 体系的崩溃,它是一种应用在很多主流软件包中的加密编程库。由于 Debian 项目维护人员所引入的一个编程缺陷(bug),用于密钥生成的有效信息熵被降到仅为 15bit,这是很容易进行猜测攻击的。结果导致紧急对成千上万的加密卡进行更换。

对于加密来说,细节非常重要。像索尼公司的 PS3 或微软公司的 XBOX 360 这类流行的游戏终端所用的 DRM 系统曾被不知不觉地引入过一些缺陷,阅读这

⊖ 另一原因是攻击 GSM 系统需要修改硬件以及专业的知识,因为到 2012 年为止还没有可以容易下载的软件和指南。因此 GSM 黑客还很少,主流媒体所报道的也都是与智能服务相关的事件(IMEI 窃取)。

些缺陷报告可以获益良多。尽管它们已经使用了一些最佳实践，例如深层防御（将冗余的安全机制多层叠加）、物理抗篡改技术以及只使用成熟研究的加密技术，历史表明最终哪一层都能够被化解，这通常都是由具体实现的缺陷导致的。也许最让人震惊的一个例子是在 2010 年一个黑客组织在不破坏索尼 PS3 的信任链的情况下成功计算出根用户的登录密码。缺陷并不位于游戏终端，而是根用户登录服务器，它构造一个参数输入给 ECDSA 签名算法，该参数本应是随机的，可实际上却不是。黑客们注意到了这一点，因此他们很容易就能计算出根用户登录密码，使得系统的安全架构完全陷入崩溃。

最终威胁到智能嵌入式电器网络安全的就是那些单纯的软件或配置缺陷。尽管存在着以安全为重心的软件开发过程，可他们似乎经常被忽略或者是因为其他原因而妥协。这一点在没有计算机网络经验的行业以及没有经历过安全事件的行业表现得尤为明显。最近的事例发生在医疗植入领域的大量安全事件中，例如可通过无线配置的心脏起搏器。最好还是认为所有运行的代码都存在易受攻击的软件缺陷，这样想会更安全一些^[10]。

还没有正规的手段来解决问题，正规的手段通常都是与某种具体的或者是有限的威胁模型相关。攻击者可没承诺只用某种攻击模型，他们更擅长不按常理出牌。正规手段也许可以向世人证明某个加密库的具体实现对于各种输入数据都能符合数学模型，因此证明它本身是个巨大的成果，会使攻击的难度变得相当大。可是正规手段还无法保证受攻击的系统整体是安全的。最近的研究表明，正规的手段能够对抗随机的攻击^[11]，但并非是来自富有创造力的攻击者的攻击。

乐观来看，在安全方面积极主动的立场会减少被攻击的机会并降低损失。以 OpenBSD 操作系统、微软公司的安全开发周期以及其他系统为例，它们都有一些共同的特点：

- 积极的对源代码和系统设计进行检视；
- 安全事件处理流程，补丁包管理；
- 安全思维设定^[12]。

第三点意味着开发人员有意识地摆脱他们通常的思维模式，即怎样使系统工作起来，转而思考系统如何会被弄得停止工作以及它们如何面对攻击。

5 小结

本章的主题的确有些悲观。它的中心思想是，安全问题是困难的，不管怎样都可能会失败：科技越发达，攻击者越用心，安全事件就会越多。

对于安全多投入的努力需要与所保护的资产的价值进行权衡。这种平衡当某个具体方案成为“标准”的时候会被打破，那时候标准会受到大量的关注，安

全损失的价值会突然变得与所有受保护的资产的总和成比例。

目前低功耗嵌入式电器网络的成熟的安全技术还比较低级，甚至有时会轻而易举地被攻破。它们中不管哪一个成为标准都会瞬间被有组织的网络罪犯所盯上，结局会是灾难性的。

可行的策略如下：

1) 设计标准时注意安全方面的可扩展性，以便未来的产品可以逐步地支持更加成熟的安全过程；

2) 将安全响应流程部署到位；

3) 为不可避免的软件升级做准备。

不论许可协议上是什么说法，从道义上讲，安全事件是要由入侵系统的人以及那些粗心大意的将缺陷植入系统并最终被人加以利用的人共同负责的。这尤其要包括那种将有缺陷的产品以号称安全的宣传推销给客户的行为。

缩 略 语

AES	高级加密标准 (Advanced Encryption Standard)，一种广泛使用的加密器
DES	数据加密标准 (Data Encryption Standard)，AES 的前身
DH	揀弗 - 赫尔曼密钥交换协定 (Diffie - Hellman key agreement)，早期非对称算法
DSA	数字签名算法 (Digital Signature Algorithm)，与 RSA 类似
DRM	数字限制管理 (Digital Restrictions Management)
ECC	椭圆曲线密码学 (Elliptic Curve Cryptography)
ECDH	基于 ECC 的揀弗 - 赫尔曼密钥交换协定 (Diffie - Hellman key agreement using ECC)
ECDSA	基于 ECC 的数字签名算法 (Digital Signature Algorithm using ECC)
ECMQV	基于 ECC 的 Menezes - Qu - Vanstone 密钥交换协定 (Menezes - Qu - Vanstone key agreement using ECC)
GSM	全球移动通信系统 (Global System for Mobile Communication)，手机通信标准
ID	身份识别 (Identification)，通常为识别码
MAC	媒体接入控制 (Media Access Control)，网络通信协议层
MD5	消息摘要算法版本 5 (Message Digest Algorithm5)，散列函数
MITM	中间人攻击 (Man in the Middle Attack)
MQV	Menezes - Qu - Vanstone，认证密钥许可协议
NFC	近场通信 (Near Field Communication)，即将应用的一种无线技术
PGP	良好隐私系统 (Pretty Good Privacy)，电子邮件加密包
PIN	个人识别码 (Personal Identification Number)，数字密码
PKCS	公钥加密标准 (Public Key Cryptography Standards)，智能卡技术标准
RSA	Rivest - Shamir - Adleman，非对称加密算法
SHA1	安全散列算法版本 1 (Secure Hash Algorithm1)，散列函数

SIM	用户识别模块 (Subscriber Identity Module), 手机密码模块
SSL	安全套接字层 (Secure Socket Layer), 在万维网中所用的协议组
TLS	传输层安全 (Transport Layer Security), SSL 的下一代
WEP	有线等效加密 (Wire Equivalent Protection), 被淘汰的 Wi-Fi 安全标准
WPA	Wi-Fi 网络安全接入 (WiFi Protected Access), WEP 的替代升级

参 考 文 献

1. P. Degauque, P. Laly, V. Degardom, M. Lienard and L. Diquelou, "Compromising Electro-magnetic Field Radiated by In-House PLC Lines," in *GLOBECOM 2010*, 2010.
2. A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell and C. Landwehr, "Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 11–33, 2004.
3. ZigBee Alliance, ZigBee Smart Energy Profile Specification, San Ramon, CA: ZigBee Standards Organization, 2008.
4. B. Schneier, *Applied Cryptography*, New York: John Wiley & Sons, 1996.
5. NIST, "NIST SP 800-57 - Recommendation for Key Management," National Institute of Standards and Technology, 2007.
6. J. Großschädl, A. Szekeley and S. Tillich, "The energy cost of cryptographic key establishment in wireless sensor networks," in *ASIACCS '07 Proceedings of the 2nd ACM symposium on Information, computer and communications security*, ACM, 2007.
7. NIST, "NIST IR 7628 - Guidelines for Smart Grid Cyber Security," National Institute of Standards and Technology, 2010.
8. S. Gollakota, N. Ahmed, N. Zeldovich and D. Katabi, "Secure in-band wireless pairing," in *SEC'11 Proceedings of the 20th USENIX conference on Security*, Berkeley, 2011.
9. S. Mahlke, M. Damm and C. Grimm, "A Smartcard Based Approach for a Secure Energy Management Node Architecture," in *Industrial Informatics (INDIN)*, 2010.
10. A. D. Rubin, "All Your Devices Can Be Hacked (Invited Talk)," in *TEDx MidAtlantic*, Washington DC, 2011.
11. J.-P. Katoen, I. Zapreev, E. Hahn, H. Hermanns and D. Jansen, "The Ins and Outs of the Probabilistic Model Checker MRMC," in *Sixth International Conference on the Quantitative Evaluation of Systems QEST '09*, 2009.
12. B. Schneier, *Beyond Fear*, New York: Copernicus Books, 2003.

第 6 章 可供能源管理的嵌入式集成平台

Stefan Mahlknecht 和 Christoph Grimm

1 简介

如今的用能产品（EuP）在很大程度上已经安装了某种电子单元、控制电器以及/或者提供了用户接口，然而对于大量销售的商用产品几乎没有哪家集成了硬件通信接口来允许集中的或分布式的能源管理。并且这些设备内在的测量能源消耗的能力是很有限的。通常当知道设备状态的时候才能了解这些信息，但无法识别会引起大量电力消耗的 EuP 功能紊乱（例如冰柜的传感器、执行器或机械部件）。对于能源的智能管理，嵌入式硬件和软件平台对于所有的 EuP 都是需要的，以便可以使用户参与到能源市场甚至是为电力网络的稳定性做出贡献。问题是这种能源管理需要精细的基础结构和昂贵的硬件。今天这些问题限制了能源管理向工业与商业领域的大规模用户发展。

未来的展望是 EuP 的所有生产商都将能源管理功能（也许还有像远程控制等这类的额外产品特性）以极低的额外成本添加到产品中，以此来创造在家用与办公领域的超大的市场。本地化的能源管理不仅可以使得本地的能源实体以智能的受管理的“子网络”方式参与到能源市场中，在需要的时候为需求方管理出力来减少所需的热备份，还可以更好地使用本地的再生能源。

本章展现了 SmartCode 项目所开发的嵌入式硬件架构，这是一个 EU 资助的研究项目，专注于精细化的能源管理。他们所建议的解决方案是低成本的系统级封装（SiP），进而称之为能源管理节点（Energy Management node, EM 节点），它可以被植入任意的 EuP 或者是智能电插座来对老一些的产品进行改装。这些 EM 节点会把它们所在的 EuP 的相关数据发送到中央能源管理单元，它反过来通过 EM 节点来控制 EuP，例如重新调度负载来更好地利用本地可用的再生能源。

本章的后续部分按如下内容组织：在对现有的家用与楼宇自动化领域潜在的技术进行概括性介绍之后，会介绍有关能源管理应用场景的各种需求，然后根据设计决定概述了一种模型与架构来满足这些需求。

2 精细化能源管理的嵌入式网络平台

人们过去与现在进行过很多尝试来将现今工业所用的技术概念进行规模压缩

以便家庭用户也可以参与到智能能源管理这一概念中来,但目前为止几乎没有哪个尝试取得了显著的市场渗透,主要困难在于:系统成本、必要的技术特性以及复杂的安装或维护操作。

使用量产的低成本芯片来进行能源管理的概念是由瑞士苏黎世 ETH (联邦理工学院)^[1]创建的“Digitalstrom”所提出的。然而投资的目的更倾向于处理为了取得跨行业认可所面对的问题,以便为它的能源管理芯片打开市场,它的目的并不是提供一种从技术上安全并且可扩展的解决方案。Digitalstrom 所关注的是无载波电力线缆通信,而本章所展示的方案将会关注高度安全的无线通信,因为它的扩展性更好,相对窄带的电力线缆通信技术更加强大。

需求方管理(Demand Side Management, DSM)已经被为数众多的科研与测试项目所研究过。其中一种采用单片集成策略的需求方管理方案是庞大的美国 GridWiseTM 项目所提出的,它所从事的是智能电网领域的研究^[2]。其对应的子项目 GridFriendlyTM 电器控制器(GFA 控制器)已由 FPGA 方案实现^[3]。这种控制器将会集成到大量的消费产品中进行电网频率测量。这种方案还仅限于需求方管理,还不支持通信以及更智能的能源管理这些额外功能特性。

家庭与建筑自动化网络面世已有十五年以上,但由于居高不下的价格以及技术上缺少灵活性,一直也没有完成大的市场渗透。

LonWorks^[4]是一种强大的技术,相比其他技术更具灵活性,但它只用在经专业安装的建筑自动化领域。它的缺点就是安装的复杂性以及需要对工程人员进行专门的培训,以便能够处理多种供应商的设备来构建网络。

Konnex (前身是 EIB)^[5]是一种欧洲的现场总线标准,自十几年前开始就应用在高质量家庭中,但它与 LonWorks 一样都有相似的缺点,天然的不适合支持能源管理方面的要求。

有线的现场总线系统的一个有力的替代品是电力线缆通信(Power Line Communication, PLC),像 X10^[6]这样的简单方案在家用环境中比较多见,主要是因为它所用的器件价格低廉。可是它们的可扩展性较差,也没有安全方面的保障,使得它们很难应用于商用环境。

HomePlug 电力线缆联盟^[7]在过去的几年中引入了使用更尖端调制技术的其他电力线缆技术,可这种技术实在过于昂贵,难以在一座商用建筑中连接成百上千的廉价设备。

上述各方案在能源管理方面的最大的挑战是,它们需要廉价的与扩展的通信组件、数据处理与数据安全以及易于安装到家用与办公建筑中。除了电力线缆通信以外,其他的技术都需要铺设额外的线缆,这对于改装市场以及通常的家用市场来说昂贵到不可取的地步。

从成本优化的角度来看,WSN 是一个不错的方案,尽管出于低成本的要求

它的可靠性与安全性面临不小的挑战。其中开发最深入的一个标准是 802.15.4/ZigBee^[8], 后续还有更新的方案如无线 HART^[9] 或 ANT^[10] 或其他专有无线系统。尽管这些无线通信网络体现出了完整性, 它们极有可能成为易于集成的、低价的整体系统解决方案的其中一部分。

除了底层的通信技术以外, 对互操作性起重要作用的还有功能特性方面的内容。它们居于应用层之上, 定义了语法(编码、数据类型)以及变量的含意和网络设备的功能要求。与其他领域相比, 建筑自动化技术在互操作和功能表象方面要更显专业。可是能源管理所用的功能表象为数不多, ZigBee 智能能源规范和 BACnet 负载控制对象算是两个显著的例外, 这两种规范均已发表, 也已建议生产厂商使用它们。其实两者之间有很大的不同, BACnet 负载控制对象包含 4 态有限状态机, 用于 EuP 表达它们的负载管理能力, 这样做的一大优势是它的简单性以及高级别的抽象能力。它可用于表示单独的设备, 也可用于表示它们的集合(住宅、邻域等), 但它对于更细致的表达则能力欠佳, 它还缺少像读表、付费和智能设备等这类额外功能。ZigBee 智能能源规范则试图提供 BACnet 所不具备的, 它的复杂度显著增加, 尤其是当处理像付费和可编程通信恒温器(PCT)这类能源管理应用时。

3 需求与方法

为了能在建筑与邻域内应用高级能源管理技术, 如 SmartCode EU 项目研究所发现的那样, 所需的基础架构与方案需要满足如下要求:

- 不增加额外成本。居家用户可不希望把钱花在他们的电热器、通风器与空调器(HVAC)还有电灯或白色家电这些电器所使用的能源管理功能上。据学术市场研究, 可提供能源管理的嵌入式系统人们所接受的价位是 3~10 美元(具体数据见参考文献[11]), 这个价位从经济角度来说也是成本与收益对等的。可目前为止能支持需求响应管理的硬件还是过于昂贵了。

- 体积小。为了将能源管理方案集成到几乎所有的家用电器中, 所用的方案体积必须要小。体积同时也是成本的关键, 集成度越高(最佳情况是只用一个很小的芯片, 并且几乎不需要额外的分离元件), 它的生产制造成本就越低。为使能够集成到尽可能多种类的家电中, 高级的能源管理必须只占用非常小的空间(如 1cm×2cm×2cm)。

- 不新增线缆。额外成本要尽量少意味着不能增加新的线缆。在很多家用与办公环境下不存在像 LonWorks 或者 BACNet^[12] 这样的自动化网络, 这些网络可以将分散的用户连接起来或者是复用其资源进行能源管理。因此只有无线通信或电力线缆通信是可行的选择。由于无线通信技术已经很发达了, 并且电力线缆

通信技术仍面对很多挑战（见第2节），解决方案的架构设计将会完全关注无线方案。

- 高安全级别。由于需要对 EuP 进行远程控制，因此需要很高级别的信息安全。对所有的数据和命令进行完整性检查与鉴权是最重要的需求，其次是受保护的与加密的接入控制。系统必须在恶意攻击与入侵面前表现出健壮性。

为了满足低价、小体积、灵活的通信架构和高度的安全性，采取了如下方案：

- 将所有的 EM 节点硬件集成到一片集成电路中，例如 SiP。这种集成使得在成本方面接近最终目标，像电力照明市场这种大批量市场那样。外部元器件如 220V/110V 输入（供电）和输出这类不可或缺的器件则要设法管理起来。

- 使用单一或多跳 ISM 频段通信接口这类的射频通信手段使得所有的发电设备、储电设备和用能设备（“EM 节点”）以及能源管理单元（EMU）之间建立通信。这将有助于建立起可靠的网络。

- 使用已有的“智能卡”设计（也被称作加密卡）来将高级别安全特性集成进来，以此保证信息的可靠性与保密性，具体形式可以是内置的或者是单独可插入的智能卡。

- 将可选的 RFID 或者 NFC^[13] 接口用于节点安装地址服务以及节点更换。或者，使用可插入式智能卡（例如微型 SD 卡的形式）以即插即用的形式来部署整个网络。这将会在增加安全性的情况下简化网络安装与信任建立过程。

并不是所有的 EM 节点都会配备同样的硬件功能，所以需要引入多样性，使得不同的设备等级都可以各自在成本与功能方面进行优化。这样做的好处是它们从中央的角度和系统整体架构的角度平衡了安全问题以及安装问题，并且始终关注高的集成度，包括在典型的 SiP 方案中所没有的高电压子系统。

4 节点架构模型概述

节点集成到 EuP 中，来获取 EuP 当前的状态和（可选功能）环境条件，与 EMU 和/或其他节点进行通信，并依据接收到的能源管理指令来触发 EuP 的相应行为。

EM 节点可以使用如下三种接口类型进行通信：

- 传感器接口：从环境以及/或 EuP 采集信息；
- 执行器接口：设置 EuP 的状态；
- 通信接口：与 EMU 和/或其他节点进行通信。

在该模型中，假定网络中的每个节点至少都具备无线通信能力。而对 EM 节点则需要有能力获取一些物理属性并基于此来控制 EuP，以及执行从 EMU 发来

的能源管理指令。因此 EM 基础节点封装了架构基础节点，增加了无线连接，并通过传感器接口与行动器接口将其功能完备。另外它还提供了与高层之间的顶级接口，使得它们可以按通常的手段去使用所有的接口。

该高层接口对应着应用层框架或应用编程接口（Application Programming Interface，API），通信属性和应用特性都是建立在它的上面。EM 节点的功能在能源管理的角度包含三个主要的功能：能源管理、家庭与建筑自动化和安全加调试。

图 6.1 展示了节点模型的结构。像之前提到的那样，架构的基础节点包含了无线通信的功能。EM 基础节点增加了传感器与执行器的功能，以及上述各层所需要的顶层 API。在 EM 基础节点之下对所需的物理现象进行了模拟。无线通信信号的传播模型是通过离散事件仿真器来提供的，而其他物理现象，例如温度，是通过 SystemC AMS 扩展协议来建模的。

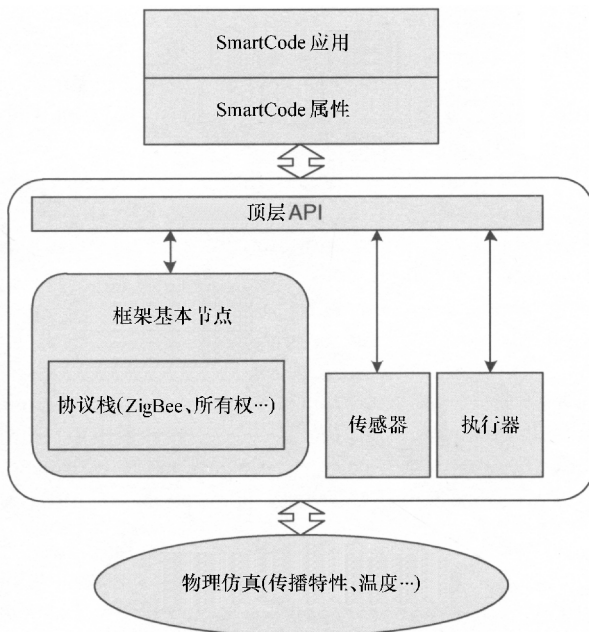


图 6.1 EM 节点功能模型图

尽管节点仿真结构不包含底层的硬件细节，它仍可以表明节点是如何由硬件构成的。节点通常都包含固件用来处理 I/O 接口（本例中用来表示传感器与执行器），以及来实现通信的协议栈。还要提供相应的 API 供用户实现自己关心的操作与应用，以及通信协议栈（例如 ZigBee 一直到路由层）。如果使用仿真的高层 API 来模拟商用节点的 API，在仿真器中运行的代码可以轻易地移植到目标系

统平台中。前提是所使用的编码风格不要超出目标平台的编译器的能力，例如如果目标平台只有 C 编译器，那么在仿真代码中也需要使用单纯的 C 语言代码以匹配未来的应用程序。

所开发的框架对于底层具体模拟器件模块是开放的，以备它们在将来会变得越来越至关重要。仿真框架是建立在 SystemC 之上的，使用 TLM 作为通信模型，使用 SystemC-AMS 来仿真环境物理属性的模拟信号模型。对框架使用 SystemC TLM 或者 AMS 硬件模型进行扩展是一种可在需要时进行调控的一种功能特性。

对于 SmartCode 节点功能模型有三种应用场景：

- 硬件/软件联合开发；
- 在相应的通信上下文环境中验证分布式能源管理算法；
- 对 SmartCode 节点/EuP 集成进行原型设计。

SmartCode 仿真框架基于这些目的来对相应部件的硬件（无线收发器、传感器与执行器接口）以及软件（嵌入式 RTOS）进行仿真。

图 6.2 展示了 SmartCode 功能节点模型的内部细节，以及它是如何与 EuP 和仿真框架下的无线网络进行交互的。

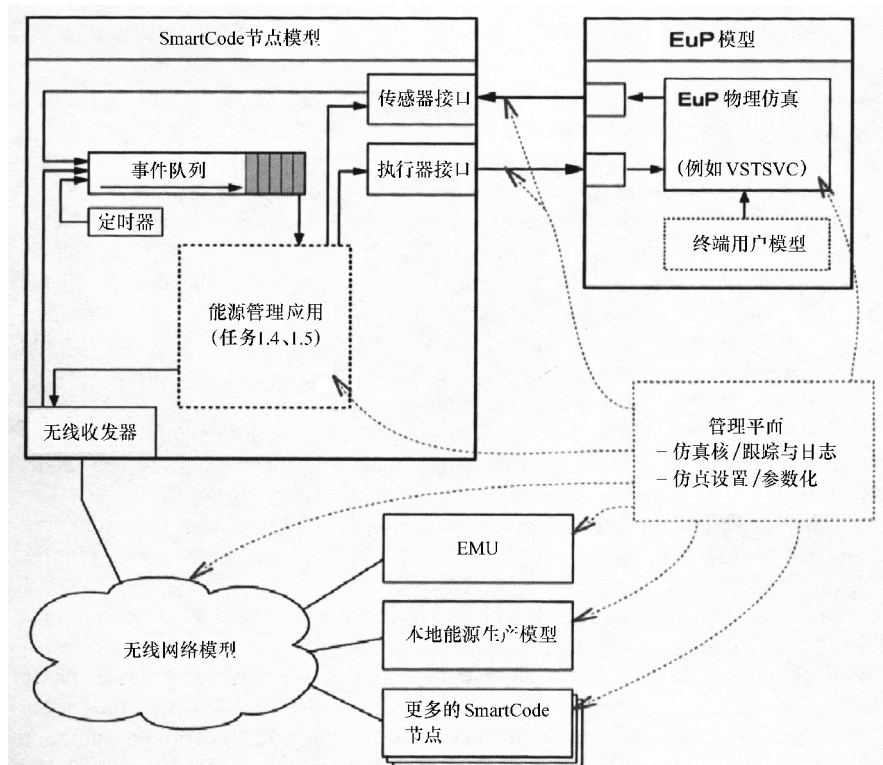


图 6.2 EM 节点模型与交互

5 EM 节点硬件架构

单一的 EM 节点有几个组成部分，可分为高压混合信号与低压数字子系统。难点在于将两种电压系统集成到 SiP 中，以此来减少外部器件的使用。

图 6.3 给出了节点架构的高层结构，其中选用的如集成电源供给模块和电能表等需要新开发，因为现有的商用集成电路还无法全方位满足要求。这样划分模块是基于由 SmartCode EU 所资助的项目而实现的，该项目在电源供电架构（见本书的其他章节）以及基于霍尔元件的电能表方面所做的研究都是聚焦于硬件开发活动的。

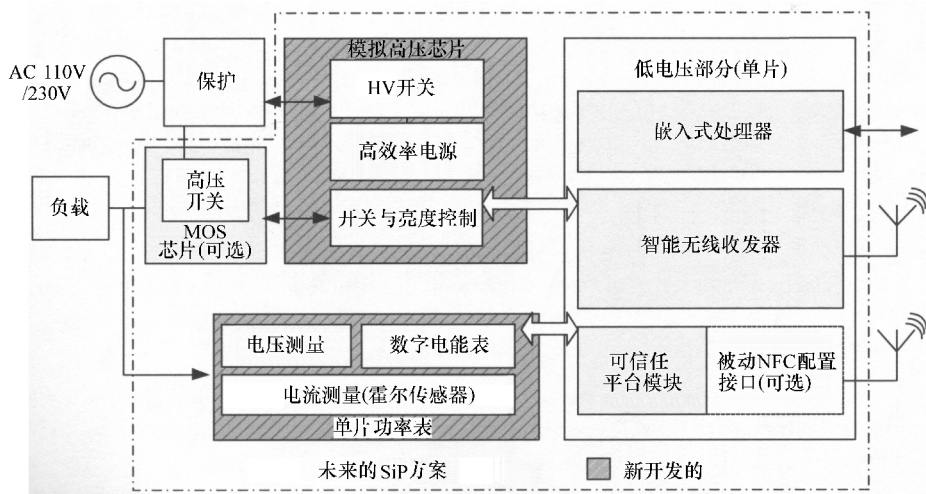


图 6.3 EM 硬件架构

一个可伸缩的架构是基于不同产品的需求，其中很多子系统都可能会或者不会成为 EM 节点的一部分。每种类型的 EM 节点都有一个互操作的通信接口，提供了给定设备类别能源管理属性（或 SmartCode 属性）所要求的能源管理功能。

在给定应用类别的成本优化方面有三种基本的方案。图 6.4 中的全功能方案可以与任意类型的 EuP 一起使用，或者集成到电源插头或电源适配器中以使 EuP 具备能源管理功能。对于那些成本敏感的设备或者是已具备了用电信息和低压供电等功能的智能设备，某些功能模块是可以省略的。例如对于那些“已开启能源管理”的智能 EuP，在将来就可以将它已内置的功能提供给 EM 节点架构。目前已实现的例子有电源模块，以及可与 EM 节点进行电力消耗或者设备状态信息交换的控制接口，在这种情况下就不需要单独的电压与电流管理模块，因此降低

了设备在能源管理功能方面所需增加的成本。

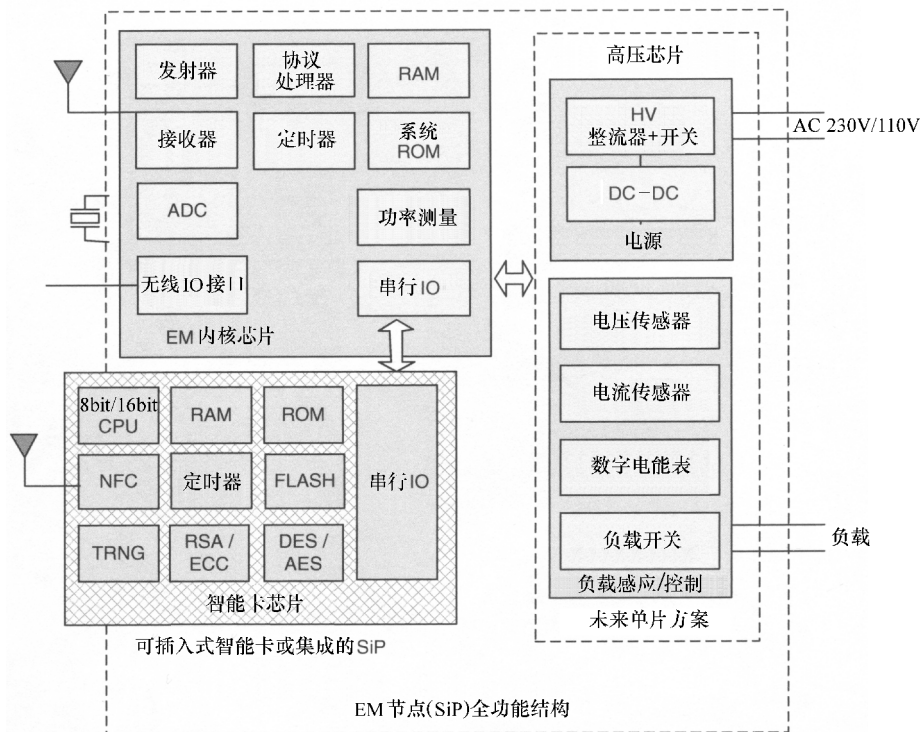


图 6.4 EM 节点完全扩展的系统架构（包含了可插入的智能卡和无线超短距离被动配置与维护接口）

另一方面，像电灯或者是那些可插各种设备的通用电源插座需要一种高电压功率测量与供电单元。出于成本原因，建议使用图 6.5 的方案，该方案不需要智能卡，智能卡所提供的具体功能都已直接集成到 EM 的芯片中。该项目仍在进展，计划分析第二种方案是否能有效降低成本，因为它仍然需要电缆的存在（其实它可以用 NFC 或者是 RFID 接口来解决）来在设备和网络间建立信任关系。这一般是由运营商或者是用户在设备安装的时候来完成。

还有一种方法来建立信任关系，是建议的第三种架构（见图 6.6），这种架构下智能卡是与设备分开交付的，就像人们使用的手机那样，手机与 SIM 卡是分开提供的。当用户需要将手机与网络建立信任关系时，它只需插入 SIM 卡，这样设备就连接到网络了。同样的或相似的方法也可以适用到任何 EuP。让每个 EuP 都提供智能卡接口（在物理上可以是一种微型 SD 卡）并不是很现实，图 6.4 的方案并没有给出可插入的智能卡，而是将智能卡集成到了 SiP 中。图 6.5 省掉了单独的智能卡，基本的安全功能由升级版本的芯片来提供。对于这两种方

案可以使用 NFC 接口近距离配置任意网络参数和安全设定。EM 节点在交付的时候本身不存储任何网络参数和私有网络密钥。在建立信任关系的时候使用超短距离无线 NFC 接口通过可编程设备来自动的交换相关网络信息，甚至还可以使用内置 NFC 接口的手机加上相应的应用程序来完成。

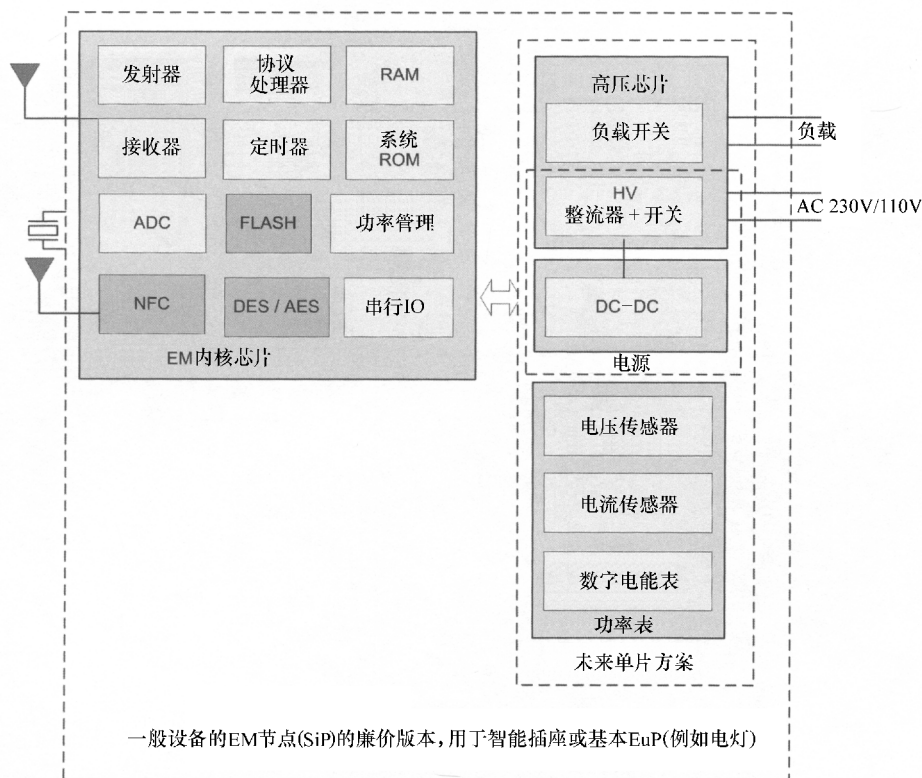


图 6.5 将加解密硬件集成到 EM 节点芯片的系统架构
(不需要智能卡, 在 SiP 中免除了额外的电路芯片空间)

NFC^[13] 是一种新颖的短距离 (10 ~ 20cm) 点到点通信标准, 工作在 13MHz ISM 频段, 在很多款手机中都有内置, 用于简便的电子支付以及在不远的将来所出现的其他应用。并不是所有的设备都能接受这类接口, 因为天线的尺寸太大, 但至少对于那些价钱低于 10 美分的被动 RFID 设备还是可行的。

建议的这三种基本的节点结构已经可以提供足够的灵活度来适应大部分的应用场景。在家用环境中还有一种比较有意思的 NFC 应用场景, 就是任何用户只要他的手机是经过 NFC 认证的, 他就可以连接到任何具备能源管理功能的用电设备上, 查询它的能量使用或者是状态信息, 甚至可以控制这些设备。这对于消

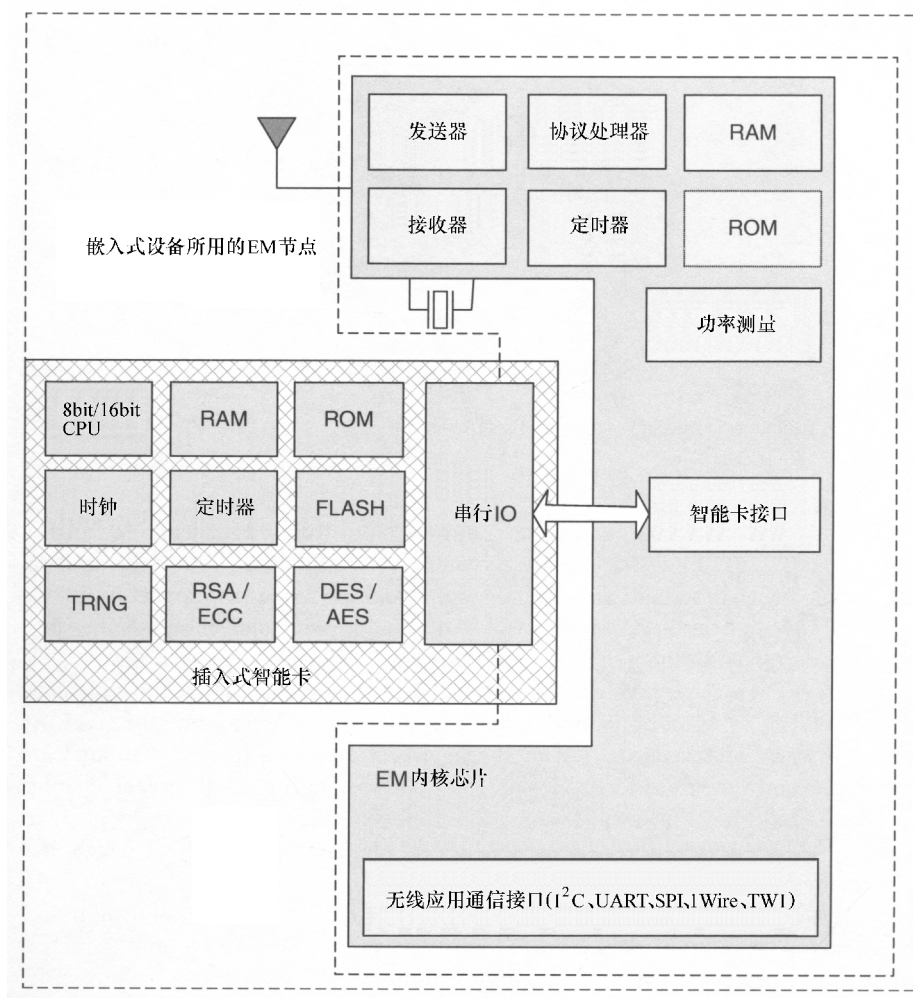


图 6.6 可直接集成到智能 EuP 的使用智能卡的设备版本（提供了基本的通信接口供交换功率状态、功耗并对设备进行控制）

费电器或者是白色家电是很有吸引力的功能，连接的建立只能在近距离完成，这样就不会给在外面的侵入者建立连接的机会。

将（通常应用在银行卡或数字护照方面的）智能卡级别的安全控制整合到系统中，这一过程现已在设计阶段，它允许把智能卡芯片中集成的处理器和内存资源使用在安全协议和应用程序处理方面，以及借用这个高度安全的环境实现节点寻址和密钥存储。

图 6.2 中所列举的嵌入式设备的能源管理架构所具备的优点是，设备的生产

制造所额外增加的成本非常小，因为只有能源管理芯片核需要集成到主板上，再加上一个很廉价的智能卡连接器和一个天线，以便 EuP 可以连接到能源管理网络中。只有当用户需要 SmartCode 功能的时候才需要购买智能卡，将智能卡插入到设备中就可以自动连接到网络。

一个最小的 EM 节点（如图 6.5 那样，但是去掉供电模块和可插入式智能卡）的具体实例就是可以无线遥控的 LED 灯，它在一次演示中用来收集电磁敏感性指标。这种 LED 灯的原型如图 6.7 所示。

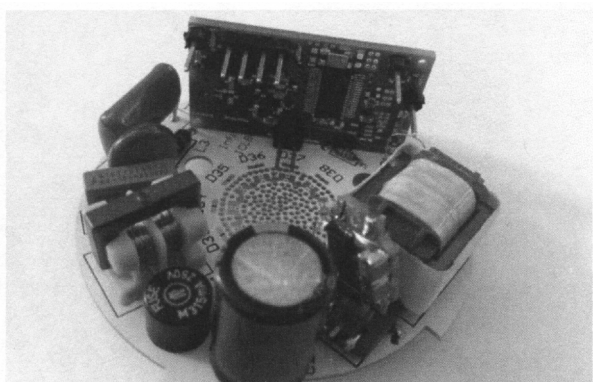


图 6.7 在 LED 灯头上集成了无线控制模块

这次演示展示了“最小的”EM 节点的功能，它所使用的射频收发器在前端模拟器件的基础上集成了内置 AES - crypto 硬件加速器的数字可编程微控制模块。这个可编程模块专门设计用来执行无线协议栈以及“简单的”应用层（对 LED 照明设备够用即可）。该无线模块还对家庭自动化应用提供了高度成本优化的方案，它所体现的优点是从高电压到低电压的变换功能都已具备，因此可以随意往该节点中添加能源管理功能。

与全功能 ZigBee 方案（它需要大量的内存和更强的处理器）所不同的是，本协议是建立在开源的 ONE - Net 标准基础上的，并大量裁剪了应用层，因此需要非常少的 ROM 代码空间。

6 EM 节点内部的功耗管理

功耗管理是很关键的，即使是节点连接在了主电源上也是如此，因为节点的平均功耗和峰值功耗越低，集成的供电模块的体积和成本就会越低。例如功耗如果从 100mW 降到 50mW，带来的区别就会很明显，外部模拟器件的数量减少，供电模块就会做得更小。

像收发器和功率表这样的子系统可以自主运行很多种任务，因此主处理器就可以解放出来，在大部分的时间里是处于休眠状态。如果再加上智能无线收发器，主处理器可以进一步从实时任务以及 MAC 层协议处理和地址过滤等功能中解放出来。然而在主处理器满负荷运转消耗大量功率的情况下，就至少需要大部分的外围器件工作在低功耗模式，以便将整体功耗限制在 50mW 以下。这样才能达到主电源输入功耗小于 100mW 的目标，因为 AC - DC 变换的效率也要考虑进去。

图 6.8 展示了一个全功能系统加上一个可信任平台的功率消耗情况，深色的方块表示可以同时满负荷运行的模块，图 6.8a 中的淡灰色方块表示在可信任平台或功率表模块中只有通信功能在运行。对于智能无线收发器，设定其在数据发送之外的所有时间都处于接收模式，这样所有的 EM 节点都保持接收器是开着的，因此可以参与路由。图中没有展示只有智能收发器是开着的情况，这种情况的功耗是最低的，而图 6.8a 和 c 的情况是用电最紧张的。

图 6.9 展示了所有功能模块都开启的情况下的功耗分布情况，100% 对应着在 3V 供电的情况下 93mW 的功耗。在引入了功耗管理的概念之后，功耗有望降低 40%。

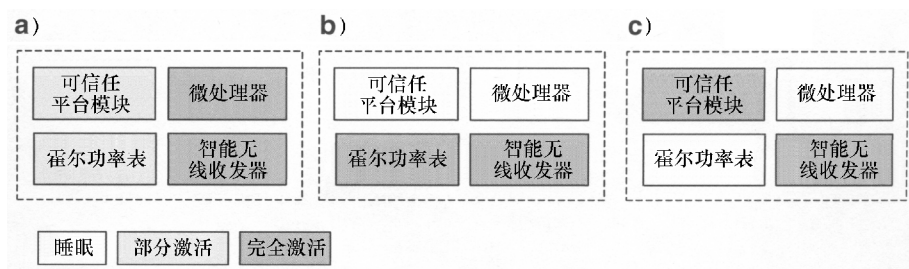


图 6.8 功耗管理（所有模块并不同时运行）

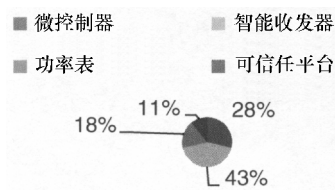


图 6.9 功耗管理（所有模块并不同时运行^①）

① 此处原书有误，应为所有模块全部开启运行。——译者注

7 小结

对于高度集成的 SiP 解决方案,以及廉价和高度安全的 EM 节点,本章给出了系统需求以及架构建议。它不仅具备运行能源管理应用的能力,还可为家庭及周边提供丰富的自动化应用。它还解决了设备与设备所有者或网络维护者之间的信任建立的问题,网络和节点的配置信息可在设备安装阶段自动生成,并在安装的时候插入或者通过 NFC 传输到设备中。

在安全功能方面(智能卡)增加了成本,这算是一种不足,但最终可获得可伸缩的解决方案来满足不同的需求,再加上智能卡的 CPU 和存储器(ROM、RAM 和 EEPROM)可被借用到通信协议和应用程序的处理中,因此在很大程度上弥补了这一不足。节点安全所带来的附加价值会迎来更广泛的市场认可,因为安全是最主要的问题,尤其是在无线应用以及专业的建筑能源管理方面。

致谢

本章的内容离不开欧洲委员会 FP7 “SmartCode”项目所做的支持,在此表示感谢。

参考文献

1. Official Homepage of the DigitalStrom Alliance www.digitalstrom.org
2. Official Homepage of the ZigBee Alliance: www.gridwise.org
3. Hammerstrom, D. J. et al. (2007). Pacific Northwest GridWise™ Testbed Demonstration Projects, Part II, GridFriendly™ Appliance Project, Pacific Northwest National Laboratory, Project Report
4. D. Dietrich, D. Loy, H.J. Schweinzer; “Open Control Networks LonWorks/EIA 709 Technology”; Kluwer Academic Publishers, 2001
5. D. Dietrich, W. Kastner, T. Sauter; “EIB Gebäudebussystem”, Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg, 2000
6. More information on X10: http://en.wikipedia.org/wiki/X10_%28industry_standard%29
7. The official Homepage of the Homeplug Alliance: www.homeplug.org
8. The official Homepage of the ZigBee Alliance: www.zigbee.org
9. More information on WirelessHart: <http://www.hartcomm.org/>
10. More information on ANT: <http://www.thisisant.com/>
11. Friedrich Kupzog: “Energiesysteme der Zukunft”. Final report of Project 810676/7837: „Integral Resource Optimization Network Concept“. TU Vienna, Institut für Computertechnik, March 2008
12. ANSI/ASHRAE Standard 135-1995: BACnet—A, Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks
13. Madlmayr G., Ecker J., Langer J. & Scharinger J.: *Near Field Communication: State of Standardization*, Proceedings of the International Conference on the Internet of Things 2008, Zürich 2008; ETH Zürich

第 7 章 低功耗智能电器的供电

Franz Lukasch 和 Christoph Grimm

1 简介

智能电器需要提供连续的通信服务（例如可被远程控制），因此需要有电源模块来为例如接受命令这样的待机活动提供少量的电力，而对于正常工作电源模块则会明显需要提供更多的电力。所面临的挑战是需要设计一种电源模块，不仅在待机模式（例如小于 1W 供电）还要在工作模式（例如 100W）都要有高的效率。为了在这么宽的范围内都取得高效率，一个典型的做法是使用两种不同的电源模块：一种小的高效的电源模块用于待机模式，以及更进一步的一种用于电器运行的电源模块，它可以在设备进入待机模式时被关掉。

为了实现这样高效的电源模块，额外的待机模式供电成本不能太高，所以需要的是高效率并且低成本的电源模块。绝不可能使用线性稳压器或简单的电阻器，因为它们会有大量的电力损失，导致很差的电源效率。也不可能使用传统的变压器，因为它们的体积大并且存在空载损耗^[1]。下面讲述一下对这类供电模块更适合的一些技术。

2 电容性电源

当需要直接从 230V 主电源向低压设备供电时，通常都会采用电容性电源^[2]。它的主要优点是成本低、开发工作量小、功率效率相对较高。缺点主要是无功电流很大，因为采用的是 X2 类型的电容器，在负载变化时会有很大的效率下降。图 7.1 给出了电容性电源的基本概念。

这种电路的工作原理是，X2 电容器 C_1 所通过的电流限制与供电的频率相关。因此这个电路可以看做一个电流源，电流要么流向稳压二极管 D_1 要么注入负载。该电流会向缓冲电容器 C_2 充电，一直到稳压二极管 D_1 所决定的电压。因此电流是恒定的，稳压二极管限制了电容器上的最大电压，当 C_2 充电完成后多余的能量通过稳压二极管 D_1 耗散掉，结果负载没有获取全部能量。这意味着该供电电路的能量消耗是恒定的，与负载无关。为了达到最大效率，供电电量需要与指定的负载严格匹配。负载电流的尖峰可以通过缓冲电容器 C_2 平衡掉，但

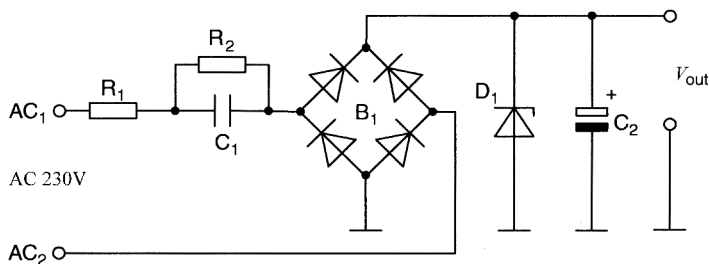


图 7.1 基本的电容性电源

负载的长期或永久的变化当需要更少的电量时会带来效率的下降，当需要比期望更多的电量时则会使电源模块失效。在设计时要注意考虑这种供电失效，尤其是在开机启动的情况下。

通过桥式整流器 B_1 可以将主电源的正负两段波形都利用起来给 C_2 充电。电阻器 R_2 的作用是当设备断电的时候通过给 C_1 放电来保护用户的安全^[3]，电阻器 R_1 的作用是当设备在供电正弦波形电压最高点时启动的情况下可以限制浪涌电流来提高设备的可靠性。由于电容器 C_1 的存在，电源的输入电流跟输出电流是相等的。这种供电模块的输出有效功率是由稳压二极管和流过 C_1 的电流来决定的。输入的有效功率是它的输出功率加上桥式整流器和电阻器 R_1 与 R_2 上所消耗的功率之和。电容器 C_1 上的损耗与其等效串联电阻（ESR）相关，可以忽略不计。这种电源模块在小电流的情况下效率还是很好的。然而这种设计引入了很大的无功功率，主要体现在输入电压的幅度会高出有效值。在后面的电路输出电压最好要匹配，这样就不需要进一步的电压变换。如后续将会讲到的，供电效率会随着输出电压强烈变化。基于此原因需要引入二级供电转换。

选取输出电压为 3.3V、输出功率为 100mW 作为无线传感器节点的典型电源需求来深入研究电容性电源。这样的电源成本极低，因为它用了很少量的廉价元器件，但是它的输出却没有与主电源进行很好的隔离。这种电源的效率随着输出功率和输出电压而不同。下面描述并分析它们之间的关系。为了研究该供电电路的效率和无功输入功率，需要分析每一个元器件。后面将讲述每个元器件的功能与参数，以及它们在整个功率损失所占的比重。对于不同的输出功率和电压水平所带来的效率差别其分析结果在随后给出。根据分析结果会给出对于原始电路的改进建议。在本章的末尾将给出对于指定的输出功率所进行的具体的效率分析，以进一步评估和改进电路。这类电源的典型输出电压是在 2 ~ 30V。

2.1 限流电容 C_1 和稳压二极管 D_1 的功能与参数

限流电容 C_1 与稳压二极管 D_1 是设计者首先需要考虑的，因为它们决定了设备的输出电压与输出功率。 C_1 为限流电容，因此它决定了该电源模块的输出

电流, 而 D_1 是电压限制器, 将对输出电压进行钳位。根据电路的设计, 输出电压越高通常会有越好的效率, 因为相应的电流就会减少, 消耗在浪涌限制电阻 R_1 和桥式整流器 B_1 上的功率就会减少。对于给定的输出功率, 高的输出电压由于对应的输入电流降低也会使得输入的无功功率降低。对于给定的输出功率, 高的输出电压还会减少电容的容量, 因此降低了放电电阻 R_2 上的功率损耗。而另一方面, 高的输出电压则需要额外增加一级供电变换来降低电压, 这也会带来效率的下降。因此第一级模块的输出电压需要考虑到后续几级整体的效率最大化来设定。图 7.2 列出了电容器的参数与不同的输出电压之间的关系。电容的计算根据 $C_1 = \frac{I_{OUT}}{(U_{IN} - U_{OUT} - U_{LOSS})\omega}$, 其中的 ω 根据主干线路的频率为 50Hz 选取为 100π 。在该图中, $U_{LOSS} = U_B + U_{R1}$ 为 1.5V, 因为单个二极管的电压降选为 0.7V, 电阻器 R_1 上的电压降选为 0.1V。然而 U_{LOSS} 通常与电容器的选取无关。

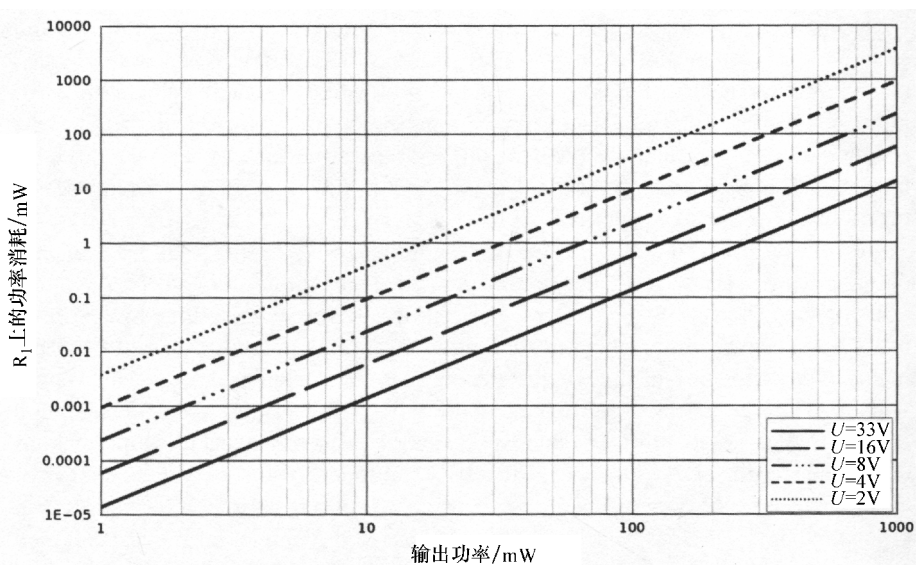


图 7.2 对于不同的输出电压电容器 C_1 的参数

从图 7.2 中可以看到, 对于给定的输出功率, 电容器 C_1 的电容量在上升, 而随着输出电压变高电容值下降。在输出功率约为 100mW 输出电压为 2V 时, 电容值选取为 700nF。对于 33V 的输出电压, 50nF 的电容值就够用了, 这会带来很低的电流因此可以降低损耗。由于电容值选取的范围很大, 对于 E6 这一行可以选取 68nF 的电容值。如果负载比期望值低, 则可以把电容值降到 47nF。

2.2 R_1 的功能与参数

R_1 的功能是当电路在主干线路输入电压正弦波形最大值的时候接入电源那

一刻来限制浪涌电流的。它的参数要尽量大，以使得桥式整流器 B_1 和稳压二极管 D_1 在上电启动或干线电压出现尖峰时能够应对电流的冲击。通常冲击的幅度会高于正常持续运行所允许的最大电流值。大部分半导体器件参数表将其命名为 I_{FSM} （非重复性正向浪涌电流）。为了选择价钱更低一些的低 I_{FSM} 元器件，需要在出现尖峰的时候精确地计算当时的电流情况。电容器 C_1 和电阻器 R_1 对浪涌

电流会有影响， R_1 通过 $I_{max} = \frac{\hat{U}}{R_1}$ 来决定最大电流， C_1 与 R_1 则通过 $i(t) = I_{max} e^{-\frac{1}{R_1 C_1} t}$ 来影响电流的下降速率。图 7.3 给出了 R_1 的电阻值为 100Ω 和 10Ω 情况下的浪涌电流，电容器 C_1 的值选为 $68nF$ 。

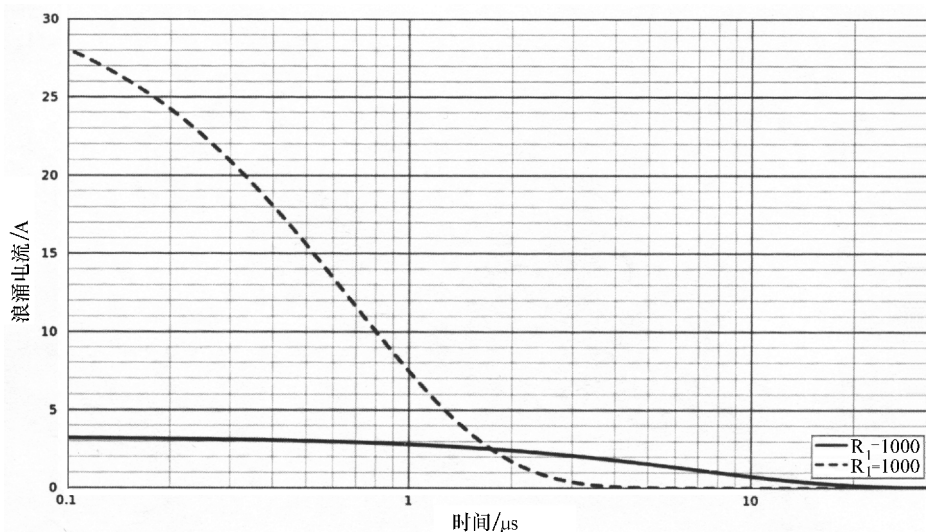


图 7.3 R_1 不同的电阻值所对应的浪涌电流

当选定具体的半导体器件时尽管需要选取最大允许电流，可以采用典型值，对于整流二极管（1N4007）的 I_{FSM} 值大约为 $30A$ ，对应的电阻 R_1 的值约为 15Ω ，其中包含了 100% 安全限度。如果该电路在电容器正在反向电压充电状态时接入电源，带来的效果是施加的电压为 2 倍的正弦波形最大值。这比想象的还要多见，因为对于弹性的接插件当接入电源的时候会看到高压打火。在稍后如图 7.10 描述的那样，电阻器 R_1 的值的增加在低电流的情况下几乎没有影响效率。该电阻器必须能承受设备在最高电压时接入电源所带来的冲击，以及主干线路随时可能发生的电压瞬时冲击。 R_1 的电阻值选取需要依据设计所支持的最大峰值电流而定。

图 7.4 列出了 R_1 电阻值为 15Ω 时在不同电压下的功率损耗。 R_1 在效率上

的影响在低输出电压的情况下要比高输出电压下高出两个数量级。对于给定的输出电压，损耗随着输出功率而上升，这是因为输出电流也随着上升。在 100mW 时，输出电压的变化所带来的损耗范围可达 0.2 ~ 35mW，从中可以看出电阻器在高输出电压时几乎没有影响，而在低输出电压时的影响非常显著。图 7.5 更进一步显示了这一效应，在不同的输出电压下列出了电阻器 R_1 的值与其所消耗的功率。

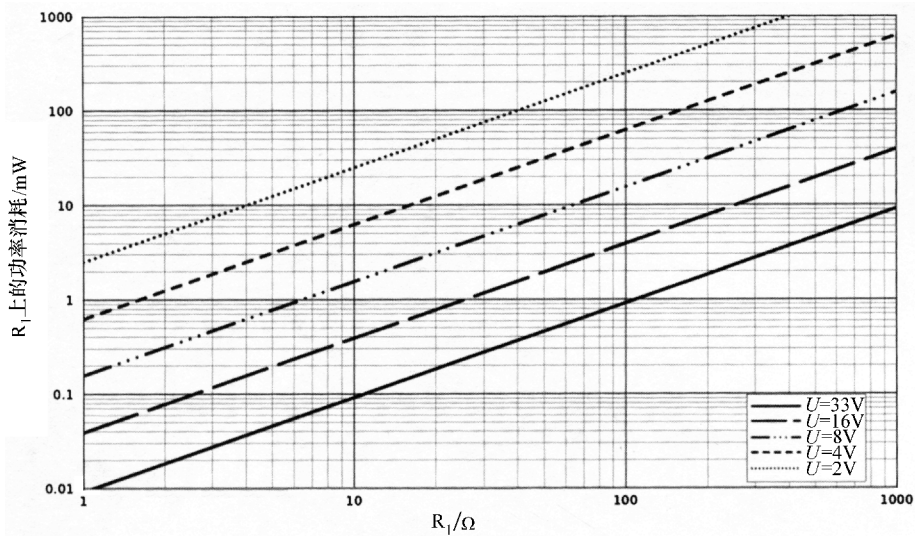


图 7.4 在不同的输出电压下 R_1 所消耗的功率 ($R_1 = 15\Omega$)

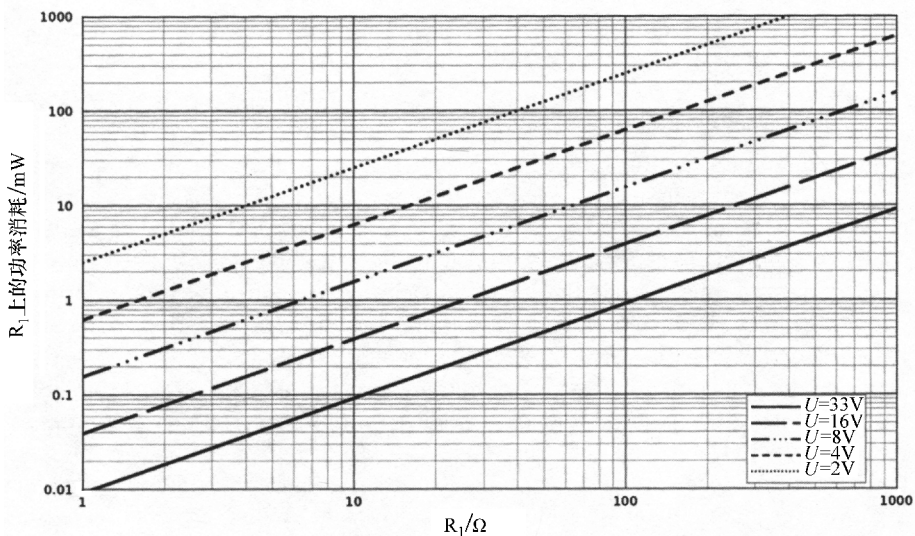


图 7.5 在不同的输出电压下 R_1 所消耗的功率 ($P = 100mW$)

将最大输出功率设定为 100mW, 在输出电压为 33V 时 R_1 的值在最常见的 10 ~ 100 Ω 范围内都几乎没有影响。在输出电压为 8V 时, 10 Ω 的电阻器相对于 100 Ω 的电阻器会增加 10% 的效率。在输出电压为 2V 时, 几乎不得不选择 R_1 的值为 10 Ω , 对于 100 Ω 的电阻器它消耗的功率约为 250mW, 这大大降低了效率。图 7.10 会给出在输出功率为 100mW 时 R_1 的阻值与电压关系的详细分析。

2.3 R_2 的功能与参数

在 6.2.4 节指出的 ICE-60204-1^[3], 出于安全的考虑, 当设备从主干电源断开 1s 的时间后, 电源插头上的最大电压不能超过 60V, 而对于元器件充电容量为 60 μ C 以下的设备可以排除在外。在设备被断开时最极端的情况电容器 C_1 上的电压值可达 325V。为达到 ICE-60204-1 所限制的最大 60 μ C 的充电容量, 若要免去放电电阻器 R_2 , 则 C_1 的最大电容值计算为 $C_1 = \frac{Q}{U} = \frac{60\mu\text{C}}{325\text{V}} = 184\text{nF}$ 。若要使用更大的电容值或要实现更高的安全要求, 需要在电路中加入放电电阻 R_2 以便在 1s 的时间内将插头上的电压降到 60V。公式 $U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = R_2 C_1$ 描述了 C_1 上的电压从初始电压 U_0 开始通过电阻器 R_2 放电经过时间 t 之后的电压。对于给定的 C_1 值、325V 的 U_0 值和 ICE-60204-1 所约束的 $U(1\text{s}) = 60\text{V}$, R_2 的电阻值计算如下:

$$U(1\text{s}) = 60\text{V} = 325e^{-\frac{1}{R_2 C_1}}, R_2 = \frac{\tau}{C_1} = \frac{0.5919}{C_1}$$

图 7.6 给出了在不同的电容器 C_1 的情况下为了从 $U_0 = 325\text{V}$ 在 1s 内降到 60V 所需的电阻器 R_2 的值。实际上在通常情况下当电源断开时电压很少会达到 325V 的最大值。

在刚接通电源时 C_1 会将 R_2 短路, 所以 R_2 不用应对浪涌电流, 然而它需要能承受高达上千伏的电压冲击。

由于 R_2 是跟电容器 C_1 并联的, 并且其阻值范围约为几百千欧, 一般可以认为 R_2 上的功率损耗与电流大小无关。对于给定输出电压, 提高电流并因此提高输出功率的唯一可行的办法是增加电容器 C_1 的值, 这会带来时间常数 τ 的增加。维持时间常数的唯一办法是降低 R_2 的阻值, 这会带来 R_2 上的损耗增加。另一方面, 当输出电压增加时对于同样的输出功率电流值会下降, 在这种情况下必须增加 R_2 的值来降低 R_2 上的损耗以此来优化效率^[2]。图 7.7 给出了在不同的输出电压下 R_2 在不同的输出功率时的功率消耗情况。

将图 7.5 与图 7.7 进行比较可以看出, R_2 上的损耗是与电流相关的, 在低电流, 即低输出功率或高输出电压的情况下, R_2 对于总体损耗的影响远远高出 R_1 的影响。 R_2 上的初始损耗会比 R_1 高, 但是 R_1 会有更高的斜率: $\frac{dP_{R_1}}{dP_{\text{out}}} > \frac{dP_{R_2}}{dP_{\text{out}}}$,

在下一节将计算整体损耗的时候会具体展开说明，还会分析桥式整流器上的损耗。

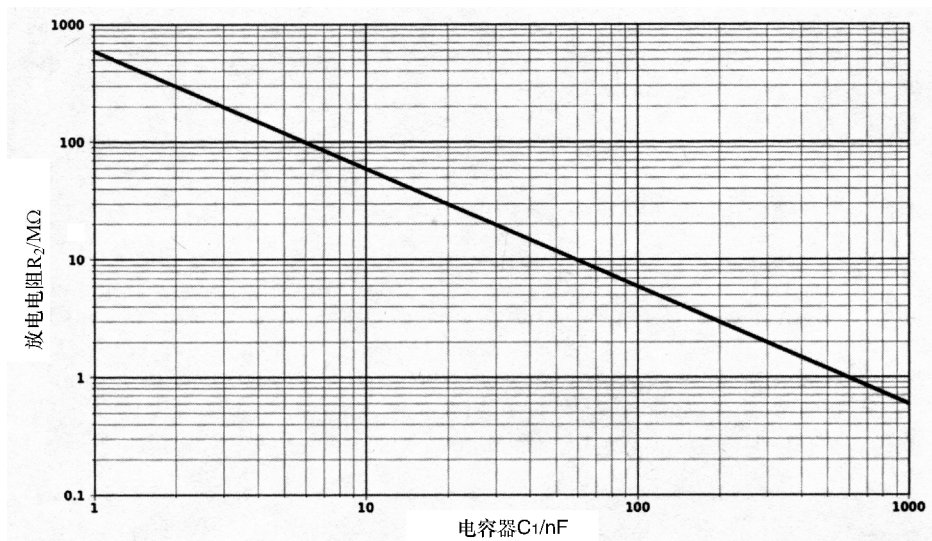


图 7.6 R_2 值与 C_1 的关系

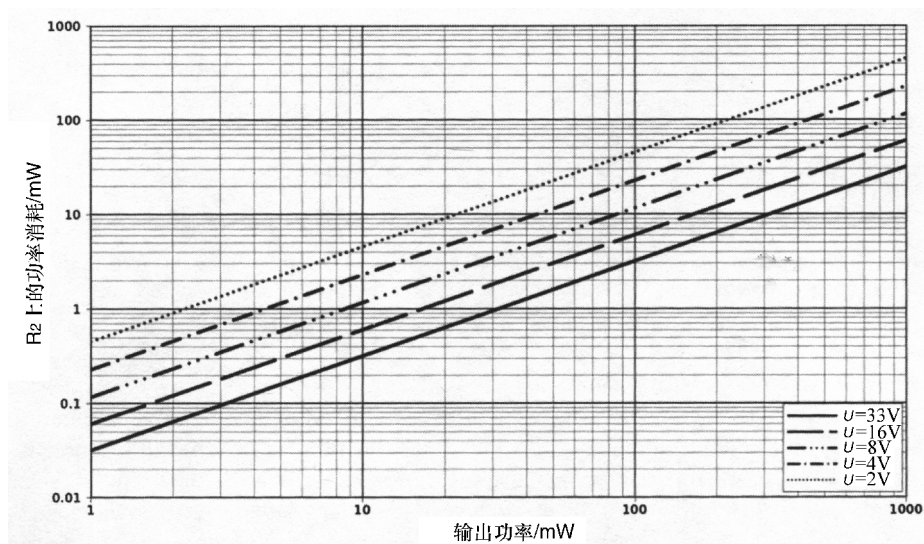


图 7.7 对于不同的输出电压, R_2 上的损耗与输出功率的关系

2.4 整体效率与整体损耗

为进行整体功率效率的分析, 首先对宽电压输出范围进行一般性分析, 然后在输出功率为 100mW 的情况下进行更具体的分析, 最后分析各种电路的变体。

电源的总体损耗为 R_1 、 R_2 和整流二极管 B_1 上的损耗之和。还没有研究过整流二极管在整体损耗中的比重，但是在各二极管上的损耗是与它们的电压降相关的。每个二极管的电压降在初始分析时设定为 $0.7V$ 。图 7.8 给出了简单电容性电源在不同的输出电压下其整体效率与输出功率之间的关系。电阻 R_1 的值选为 15Ω 。 R_2 的值在之前已经讨论过是依赖于输出功率与输出电压的，这一点在图 7.8 中也已经考虑到了。

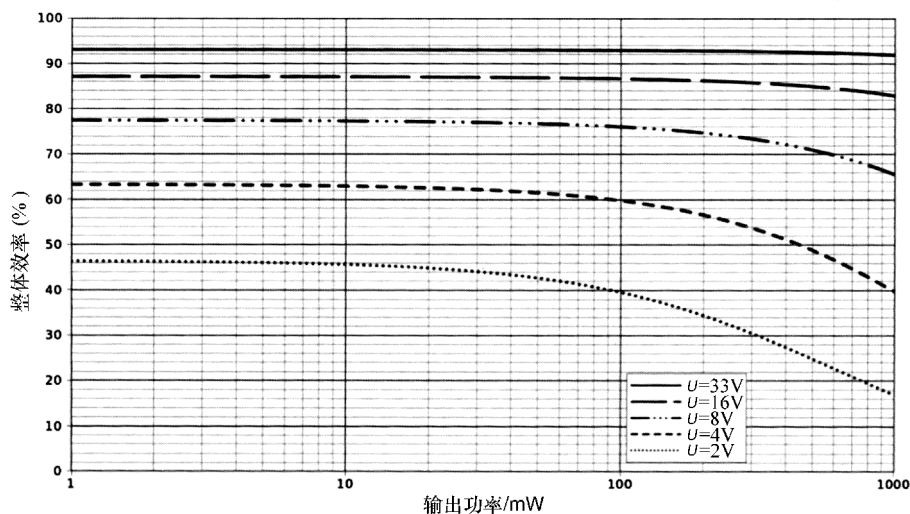


图 7.8 给定不同的输出电压，整体效率与输出功率的关系

效率是与输出电压成正比关系的，尽管电压超过 $33V$ 以后仅会有很小的效率提升。在输出电压为 $33V$ 时电源的整体效率在输出功率为 $100mW$ 下为 93% 。对于高达 $1W$ 的输出功率效率则会降到 92% 。这种能实现一直到 $1W$ 下的高效率是因为电阻 R_1 的值很低，为 15Ω 。对于低输出电压基础效率则会下降，在高输出功率和高输出电压的情况下效率下降得尤为明显。电阻值 R_1 的增加会在很大的输出功率范围内引起效率的剧烈下降。图 7.9 给出了电容性电源在输出功率为 $100mW$ 下各输出电压所对应的整体效率。

与预期相同，在高输出电压的情况下效率会更高一些，但是当电压大于 $20V$ 时效率的提升就会很微小。该图选取的限流电阻 R_1 为 15Ω 。我们对各元器件在整体损耗进行具体分析从而进一步提高电路的性能，图 7.10 给出了归一化输出功率为 $100mW$ 时在不同的输出电压下电阻 R_1 、 R_2 和整流二极管 B_1 上的损耗占整体损耗的比重。

图 7.10 显示了在输出电压很高的情况下整流二极管 B_1 在整体损耗中的比重

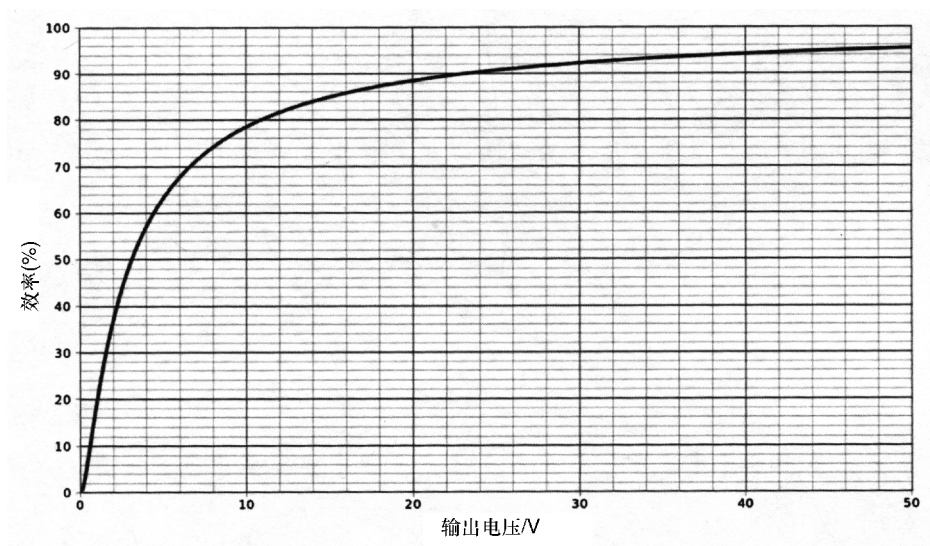


图 7.9 100mW 时的整体效率

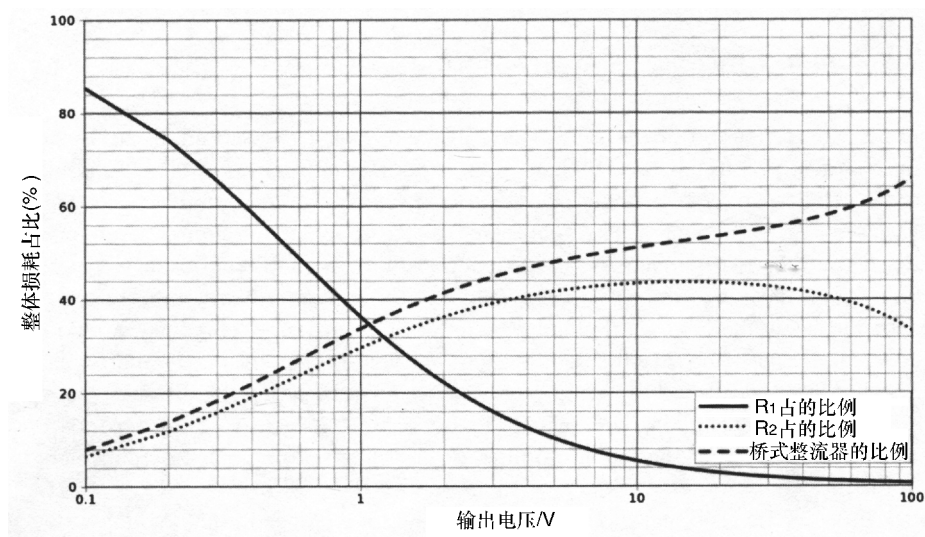


图 7.10 各元器件在整体损耗中的比重

最大，其次是放电电阻 R_2 。 R_1 在输出电压高于 10V 时在整体损耗中几乎没有影响。如果桥式整流器无法集成进来，则需要引入外部元器件，因此会想到去掉桥式整流器而用一个单独的整流二极管代替。这还会带来一个额外的好处就是元器件的数量减少了，成本也会因此降低。如果这样做的话，输出电压只有一半的波

形可被用来给电容器 C_2 充电。稳压二极管的正向通路可在电压波形为负的时候起到一个单向阀的作用来给电容器 C_1 放电，这样电流可以持续。由于只有一半的波形可被利用，电容器 C_2 的值需要翻倍以便跟有桥式整流器的电路相比有同样的输出电流。因为 C_1 的值需要增加， R_2 则需要减少，这增加了 R_2 上的损耗，因为电流增加了， R_1 上的损耗也跟着增加。在整流二极管上的损耗没变，因为只有一倍的电压降但电流却翻倍了。因此 R_2 在整体损耗中的影响最大，整体效率也要略低于带有桥式整流器的电路。图 7.11 给出了不带桥式整流器的电源原理图。

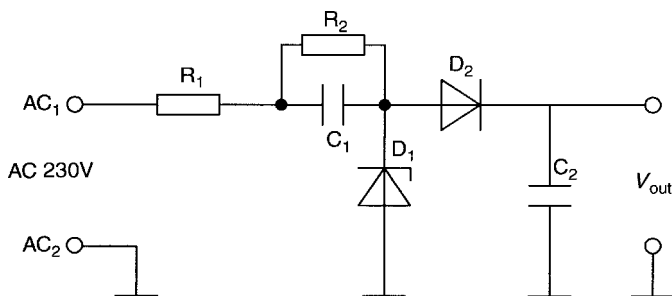


图 7.11 去掉桥式整流器的电容性电源

图 7.11 中的稳压二极管 D_1 有两个功能，除了对电压进行钳位，它还在 D_2 反向截止期间起到续流的作用。该电路的实际输出电压为稳压二极管 D_1 的钳位电压减去 D_2 上的电压降。图 7.12 给出了在 100mW 时该电路与带桥式整流器的电路之间的性能分析，该图中可以看到不带桥式整流器的效率在输出功率为 100mW 和 33V 的输出电压时为 90%。这两种电路的效率差别在低输出电压时更加明显。想要通过增加输出电压的方法来提高效率仅会在有限的范围内起作用。通常后续电路所需的工作电压都很低，或者是在工作电压低的时候可以有很高的效率，所以要增加一级电压变换器，这也要带来效率的下降。需要找到一种折中的办法来使两级电源的总体效率最佳。

在这个修改过的电路中整体损耗的大部分来自于 R_2 ，因此很有优化潜力。像以前说明的那样，该电阻器仅用于完成 60 μ C 或更多的充电容量并且仅用于用户接通、断开电源的情况下。如果该电源集成在设备中，没有外部接插头，电阻器 R_2 的值就可以设计为很大的值甚至可以去掉。图 7.13 列出了两种电路下效率与输出电压的关系。

图 7.13 比较了在带与不带桥式整流器的情况下电源的效率，电阻器 R_2 已被去掉，输出功率设定为 100mW。在输出电压为 33V 时效率约为 96%。去掉 R_2 的这个情况需小心使用，因为它会带来安全问题。还可以考虑不要将 R_2 完全去

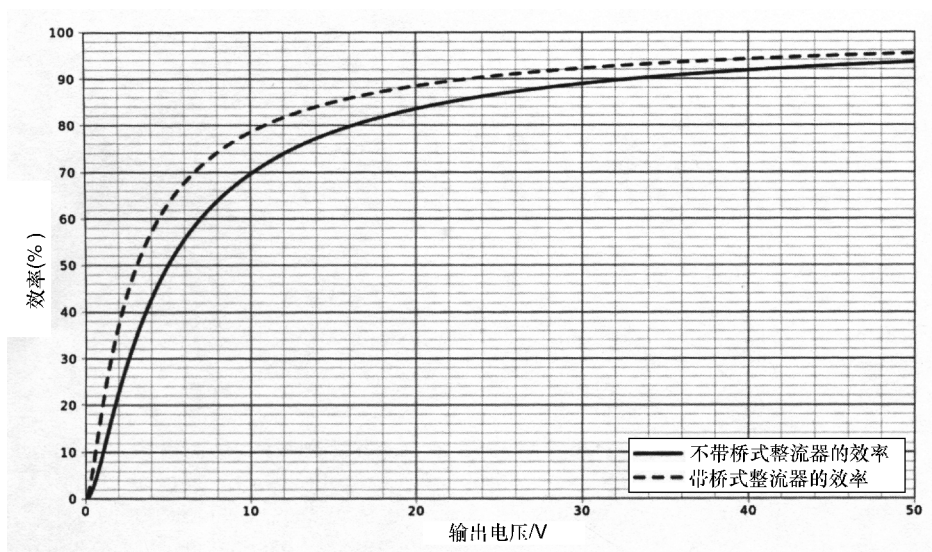
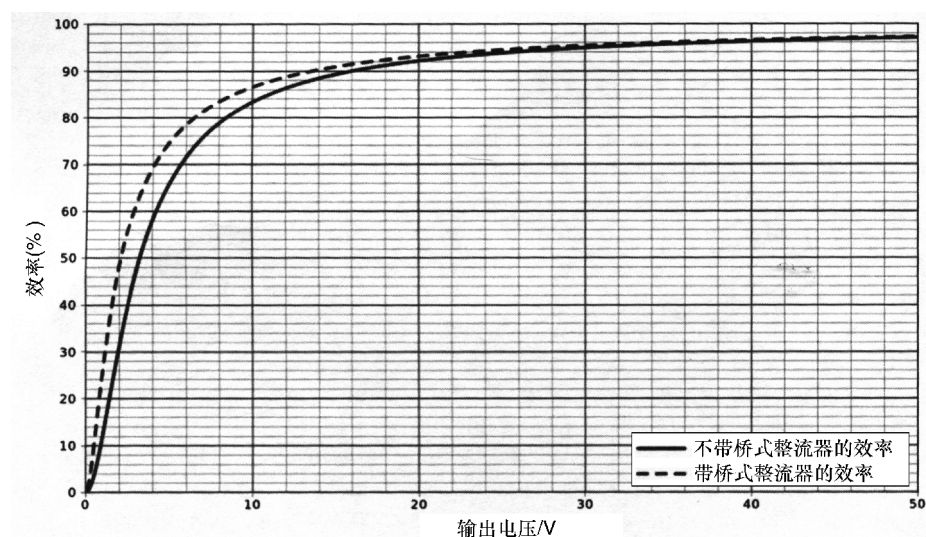


图 7.12 带与不带桥式整流器的效率对比

图 7.13 没有 R_2 的情形下的效率对比

掉，而是增加它的电阻值以此来减少损害。在这种情况下 C_1 所需要放电的时间就会增加，因此这方面也要认真考虑。

除了效率问题，无功输入电流也是应该考虑的问题。图 7.14 给出了两种电路可能的无功功率，输出功率设定为 100mW，在不同输出电压下的比较。

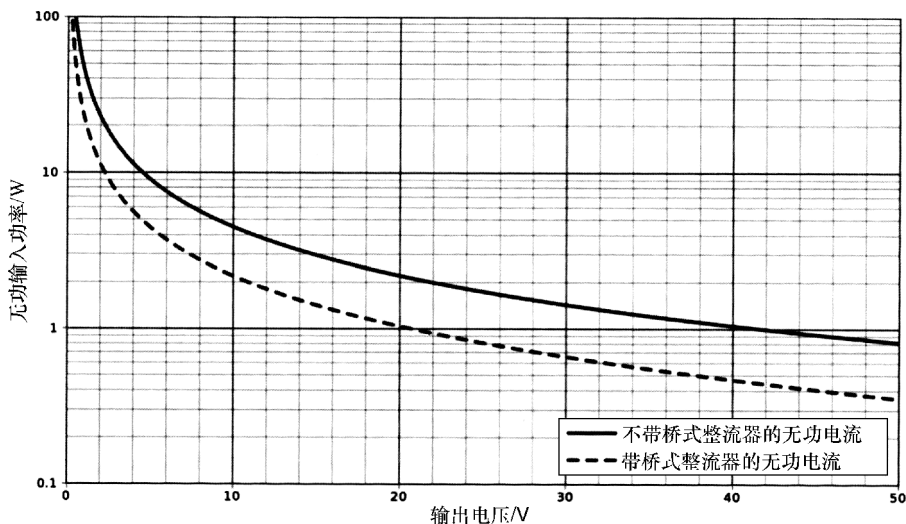


图 7.14 无功输入功率与输出电压间的关系

对于没有桥式整流器的单相电流的版本，无功输入功率增加了一倍。对输入功率为 100mW 以及输出电压为 33V 时，输入无功功率在带桥式整流器的情况下约为 500mW。这种效应在原理上只有通过降低输出电流从而降低输出功率的办法来减少。

2.5 更换负载后的效率

电容性电源的结构设计使得输入功率始终保持不变，当负载没有完全吸收输出功率的时候，功率是通过稳压二极管耗散掉的。理想情况是负载保持恒定，如果负载不匹配或者可变则效率非常低下。为了使得在剧烈变化的负载下保持高的效率，该电路可使用 MOS 开关来扩展。图 7.15 给出了对应的修改后的电路。

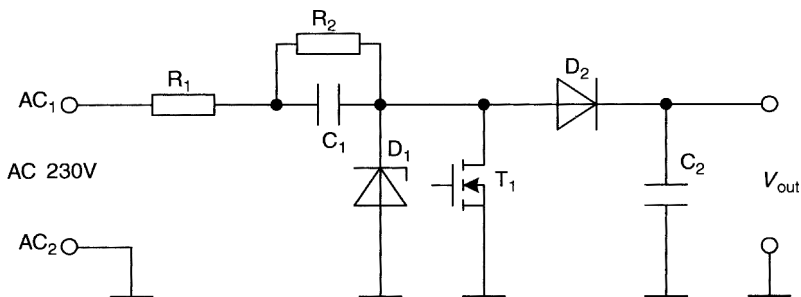


图 7.15 可实现低待机功率的电容性电源电路

当负载需要使用小于最大功率的功率时，可以通过缓冲电容器 C_2 来供电，

通过场效应晶体管 T_1 来将稳压二极管短路，以此来减少电源的有效功率消耗。 T_1 可以将稳压二极管短路，使得电源模块进入低待机功率模式。在此期间电源模块仅在 R_1 和 R_2 上耗散功率，其数值基于效率分析的结果通常小于 10mW，并随着输入电流而变化。另外当稳压二极管被短路时，在 T_1 上也有功率损耗，但因为在 R_1 、 R_2 和 D_2 上的损耗相对很高，场效应晶体管 T_1 上的静态损耗则相对较低，因为场效应晶体管具有低导通电阻，通常低于 1Ω 。这一概念在带桥式整流器的情况下也会起作用，但是它需要增加一个场效应晶体管来断开缓冲电容器 C_2 ，防止电流反向流动。或者在带桥式整流器的情况下仍使用 D_2 ，但这样会在正常工作的时候损失效率。

还有一个问题是控制晶体管开关的逻辑电路也会消耗少量的功率。另外依据开关频率不同，晶体管还会有开关损耗。这一点可使用过零电压开关器来避免，也就是说在过零电流期间开关。除了这些额外的功率损耗，这一概念在可变的负载下会带来极大的效率提升。这一概念的另一优点是通过控制场效应晶体管 T_1 可望调节稳压二极管的电压，以此来实现动态调整输出功率，这会使得电源模块更加灵活，甚至可以完全去掉稳压二极管，不过最好还是保留它用作过电压保护。另外有一点还没有提及，就是这种改进的电源的上电启动过程，将会在后面讨论。

典型的电容性电源使用经过整流的交流电来对缓冲电容器充电或者直接给负载供电。所提供的功率是由输出的恒定电流和缓冲电容器上的电压来决定的。当电路刚通电时缓冲电容器上没有电压，它必须先充电才能使整个电源提供所设计的完整功率。如果在缓冲电容器充电到它的标准电压之前负载消耗了过多的电流，则该电源无法提供完整的功率，因为电流恒定但是电压降低了，这样输出电压始终达不到额定电压。同样的情况也会发生在正常运转的情况下，如果负载瞬间消耗过多的电流，也会使缓冲电容器上的电压下降，该电源则无法提供 100% 的功率，直到电容器重新充满电。如果电源的设计者没有考虑到这一点的话，输入电流会相应增加，因为负载所需要的功率恒定，而电容器上的电压下降，这会使得电源吸收更多的电流来为电容器充电。这有可能导致电压突降，严重影响供电质量，会给后面的数字电路带来无法预测的影响。为避免这样的问题，需要给负载装一个“功率就绪”电路，以确保当电压达到标准时再开始吸收电流。缓冲电容器的选取需要依据最大可能的峰值电流，这样电压才能保持足够的水平来供给负载以及给电容器充电。如果为电路加装了场效应晶体管使其具备待机功能，用于控制场效应晶体管的控制电路还必须确保在上电阶段当控制电路没有电源供电的时候仍能使得场效应晶体管的开关状态正确。

3 电容性电源的集成电路方案

图 7.16 给出了电容性电源的集成电路方案。限流电容器 C_1 、缓冲电容器 C_2 以及保护电阻 R_1 和 R_2 仍留在片外。 $T_1 \sim T_4$ 构成了全集成的桥式整流器，省掉了外接的二极管，整流损耗也被极大降低。晶体管 T_5 与它的控制逻辑电路构成了非集成电路概念下的稳压二极管^[4]。因为输出电压 V_{OUT} 通过控制逻辑可调，它可以很容易适应负载的实际功率需求。通常电压会设为最大值，或 T_5 是完全关断的，电源置于待机模式，也就是除了 R_1 和 R_2 上的损耗之外整个电路都不会吸收功率。在这种模式下负载是通过电容器 C_2 来获取能量的。当 C_2 上的电压降到一个特定值之下后，电源会重新进入激活状态，直到电容器再次充满。 T_6 和它的控制逻辑电路是有必要的，用于当 T_5 被短路进入待机状态时起到维持电压的作用， T_6 同时也是桥式整流器设计的一部分。

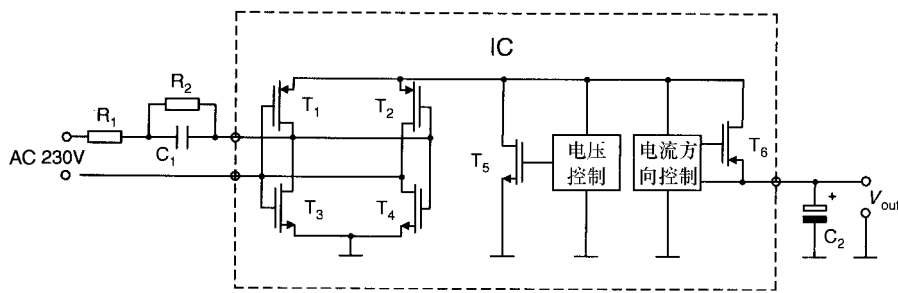


图 7.16 电容性电源的集成电路方案

4 基础的降压变换器

基础的降压变换器^[5]是通过主电源直接向负载进行低压供电的另一种电源。同电容性电源一样，基础的降压变换器也是非隔离的。它的优点是几乎没有无功输入电流，缺点是会有很多电磁干扰，这是由高压场效应晶体管 T_1 的开关切换带来的，另外降压变换器会更复杂，这会带来成本的提高。图 7.17 给出了简单的降压变换器的电路原理。

在开关场效应晶体管的导通阶段，通过 L_1 的电流上升到预定点之后控制逻辑电路会将场效应晶体管关断。由于流过电感器的电流是连续的，当场效应晶体管关断后电流会从 T_1 切换到 D_1 。在此关断阶段，电流不断下降，直到控制逻辑再次使 T_1 导通。该电路的损耗主要发生在开关（ T_1 和 D_1 ）以及电感器 L_1 上。在

高电流的情况下电感器的损耗通常占主要部分，在高切换频率和高切换电压的情况下，主要损耗来自于开关损耗。从该电路的原理来看，降压变换器的效率在输出电压接近输入电压的时候为最佳。当从主电源给低功率和低电压的负载供电时，该电路会有明显的问题。为了降低成本，电感器的尺寸也就是说它的电感值必须很小，这样就需要更大的电流或者更高的开关频率来实现同样的功率。电流必须依据小型电感器所能承受的最大电流要求来保持在限定的范围内，同时也是为了降低电磁辐射干扰。开关频率因此不得不增加，这会使得开关损耗成为最大的问题。由于 T_1 在关断时必须承受主电源的最高电压，它的物理体积不得不做得很大，这会带来很大的寄生电容。场效应晶体管的栅极充电电荷可以通过控制逻辑的绝热电荷恢复电路来去掉，源极和漏极间的充电电荷则需要在每次开关周期来泄放掉。图 7.18 给出了 N 沟道低功率 MOSFET 的开关周期。

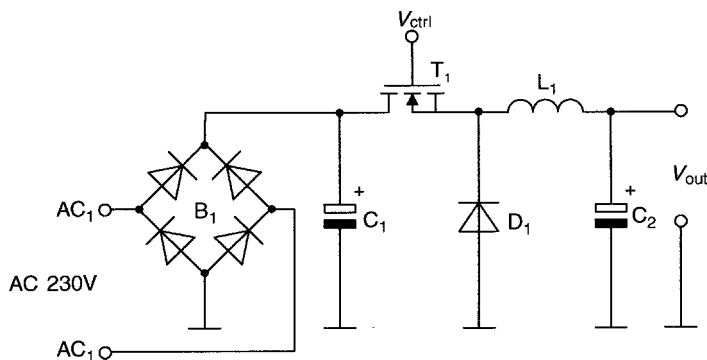


图 7.17 简单的降压变换器

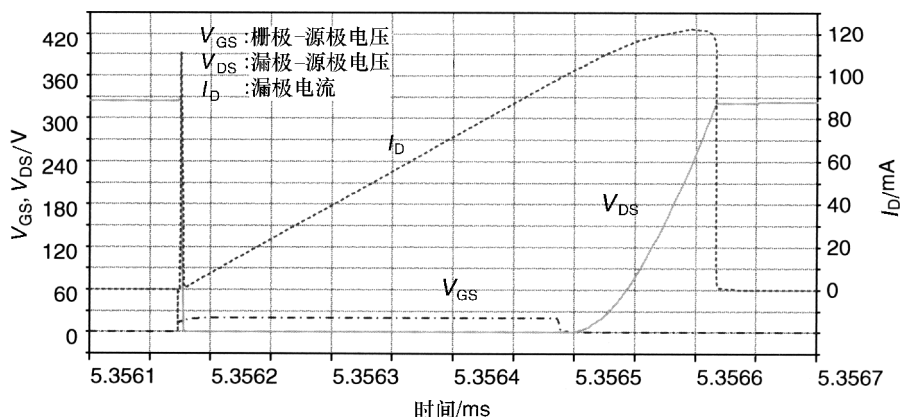


图 7.18 在降压变换器中 N 沟道 MOSFET 的开关周期

施加正向的栅极—源极电压，场效应晶体管导通，也就是说漏极—源极电阻下降极大。这会使得场效应晶体管内的漏极—源极电荷通过瞬间的高峰电流泄放掉。峰值过后电流依据电感值 L_1 和它上面所施加的电压而上升，当电流值达到可以关断的水平时，控制逻辑则会将场效应晶体管关断。这时仍然流向场效应晶体管的电流则开始向漏极—源极间的寄生电容器充电，同时建立起漏极—源极电压，当漏极—源极电压达到输入电压的水平时，电流切换到图 7.17 中由二极管 D_1 构成的第二级开关电路中。每一周期所耗散的能量为 $CV^2/2$ ，其中 C 为 MOSFET 的输入电容， V 为输入电压，因此随着电压的上升功率损耗会急剧增加。需要设计者更进一步考虑的是输出电容与电压的关系是非线性的，通常在低电压的范围内是上升的。

图 7.19 给出了某超低电压电源中 N 沟道 MOSFET 的典型损耗，可以看出由于场效应晶体管输出电容的非线性，曲线并不是单纯的二次方曲线。

5 改进的降压变换器

当使用降压变换器来从主电源直接向低压设备供电时，电感器上的电压通常会很高，因此短时间内的电流会很大，这要求有很大的电感值或者是采用更高的开关频率从而带来更高的开关损耗。该问题的解决方案可以是选择性地使用输入电压正弦波形的一小部分，即接近输出电压的那一段，以此来降低损耗。这一概念尤其适合在超低功率的设备上使用，其功率通常在 1000mW 以内。这一概念还需要去掉输入电容（见图 7.17 中的 C_1 ），以及采用升/降压变换器^[6]，图 7.20 给出了这种电源的部分集成方案。

场效应晶体管 T_{HV} 是在片外的高压开关，只要输入电压的正弦波形低于一定幅度它就会给集成电路中的升/降压变换器通电。该方案有两个关键点：相位检测器用于提供信息来决定 T_{HV} 的开或关；再就是启动电路，用于确保电源可以正常启动。这一概念最主要的优点是高压开关在每个周期内只有两次开关动作，甚至还可以使集成的低压开关 $T_1 \sim T_4$ 工作在线性区间，因此可以使用很高的频率，得到很高的效率。这样就可以使外部电感器 L_1 的体积降低，甚至可以将其集成到芯片里。电容器 C_1 需要足够大以确保当电源不能从主电源获取功率时可以支持负载的运行，也就是当主电源过零期间以及输入电压的正弦波形超过预定值的时候。电容器在高电压的情况下存储能量更有效率（ $E = \frac{CV^2}{2}$ ），所以如果能引入二级电源的话就可以选取更小的电容值。图 7.21 给出了高压开关 T_{HV} 之后的变换器的输入电压波形。

频率是 50Hz、峰值电压为 325V 的情况下，在主电源的正弦波形过零点附近

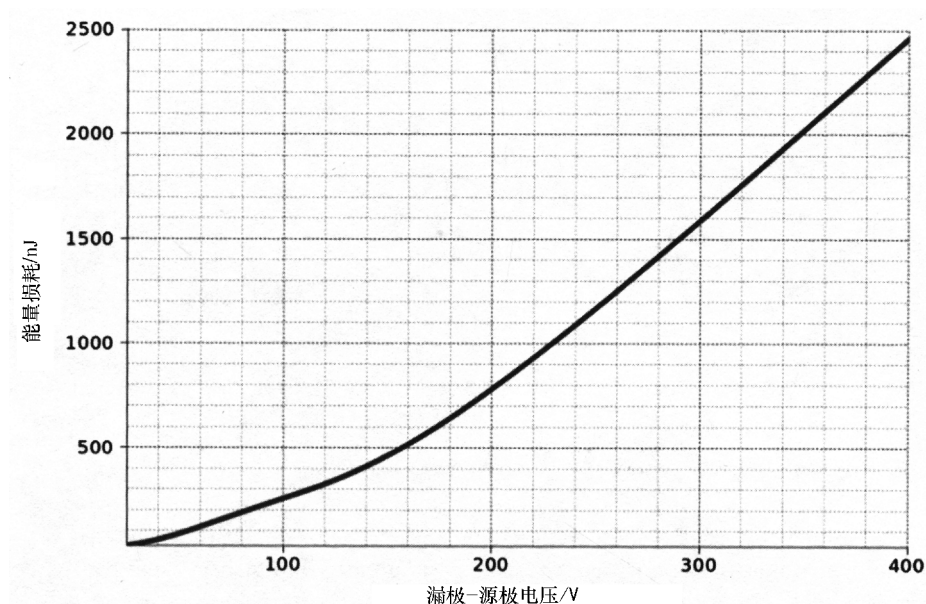


图 7.19 小型 N 沟道 MOSFET 每开关周期的典型损耗

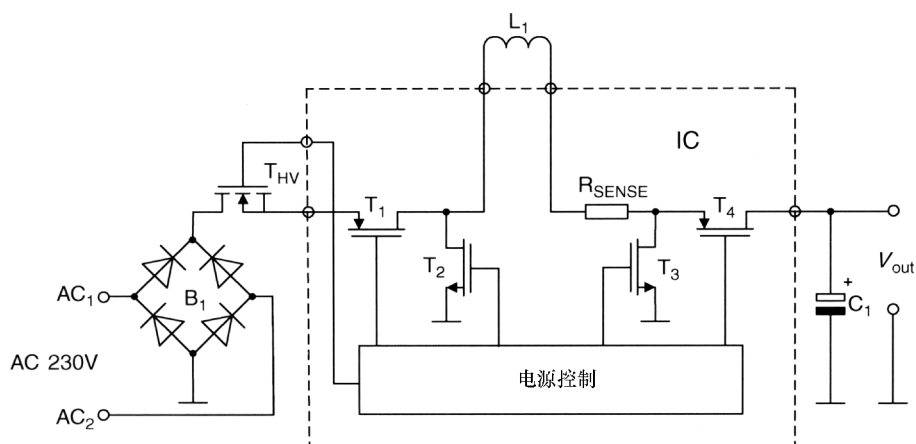


图 7.20 改进的集成超低功率电源

电压的斜率差不多是 100V/ms ，因此该电源每个周期可以从主电源获得可用供电的时间窗 (time window) 约为 $470\mu\text{s}$ 。这一点再次表明该电源只适用于极低功率用电设备，否则的话在这个很短的时间窗内消耗的电流会非常大，这样会引起极大的电磁干扰 (ElectroMagnetic Interference, EMI)。即使是用于超低功率的用电设备，该电源仍有问题，因为升/降压变换器芯片所能处理的电压范围有限，主

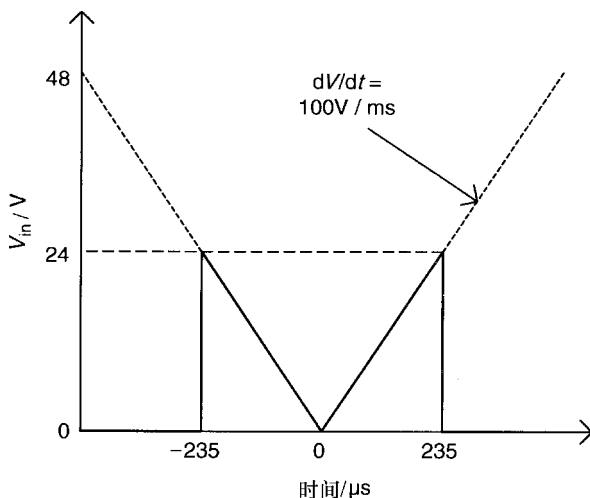


图 7.21 主电源可用的输入电压区间

电源的最大电流谐波限制也约束了最大可能的电流。该问题的一种解决办法是使用更宽的时间窗，使高压开关工作在线性区来对更高的电压进行钳位，这样电源所能供给的功率会增加但是效率会下降。在效率、EMI 和允许的输出功率之间可以进行折中。电源可以设计成可配的，这样时间窗和最大允许电流都可以根据需要来进行控制。图 7.22 给出了在高压开关之后的集成电路的输入电压工作在更宽的时间范围的情形，可以看到当电压超过设计的最大值时在场效应晶体管上会发生线性损耗。初步估计，当时间窗扩大为 2 倍时，效率大约下降 25%。

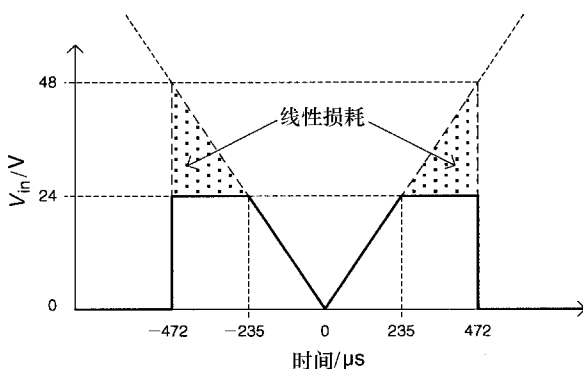


图 7.22 扩大的时间窗（升至 48V）

高压场效应晶体管可一直保持运行在线性区间，这要求后续的电路在吸收电流的时候要依据输入波形的相位来进行。该方案的灵活性最高，因为电路在大部

分时间可以工作在主电源的过零点附近, 这样的效率最好, 而当负载突然需要更大的功率时, 可以将时间窗扩大。

参 考 文 献

1. N. Nielsen, "Optimizing Efficiency On Conventional Transformer Based Low Power AC/DC Standby Power Supplies", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.
2. G. Ortenzi and J. Antenor, "Switch mode power supply applied to very low cost electronic board of home appliances", Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian
3. IEC 60204-1, Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements, section 6.2.4 - Protection against residual voltages, 1995
4. S. Finco, A. P. Casimiro, P. M. Santos, P. Tavares and M. I. Castro Simas, "High Performance NMOS Active Zener and Rectifier Diodes", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE
5. M. Cory, "Conventional and ZVT synchronous buck converter design, analysis and measurement", PhD thesis in the School of Electrical Engineering and Computer Science in the College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida, 2010
6. K. Muro, T. Nabeshima, T. Sato, K. Nishijima and S. Yoshida, "H-Bridge Buck-Boost Converter with Dual Feedforward Control", International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009

第 8 章 智能电表的能耗测量技术

1 简介

随着智能电网的技术进步以及潜在的可接插式替换能源的存在，智能电表会成为未来能源输送网络最重要的组成部分。智能电表是用来测量能耗的电子设备，并将该信息按照一定的周期与中央监控系统进行通信。中央监控系统则因此需要能够对智能电表进行配置与编程。与智能电表的通信可以是无线或者有线通信协议。智能电表的通信接口需要具备自动读表（Automated Meter Reading, AMR）功能，以及通过远程控制设备进行配置的功能。除了这两种基本的操作，智能电表还需要提供实时的或接近实时的读表功能、断电通知功能以及功率质量测量功能。基本上来说能源测量设备要能测量到电力线缆的第十九次谐波分量，这是以免某些用户使用非线性的耗电设备 [例如 UPS（Uninterrupted Power Supply，不间断电源）] 产生了高次谐波而产生错误的计费账单。这意味着每个测量通道的带宽都需要很宽。现代化的智能电表会与能源供应商进行协商以降低局部的峰值电流消耗，并且进行一致性调度，这样为迎合局部能源消耗所需的最大电厂的数量将被减少。另外智能电表还需要对它本身的能源消耗进行调度，以此来减少能源的总体消耗。智能电表还可用于对挂接在其上的用电设备进行调度，以此来降低局部的峰值功率消耗。智能电表通常会支持多种节能模式（例如睡眠模式、待机模式等），这需要更快的测量输出稳定时间。这给 DSP 的设计带来了严格的约束，因为需要快速稳定的滤波器设计。后续将会对智能电表的两种基础组件进行概述。

1.1 能耗测量单元

智能电表的通信接口负责维护与远距离监控设备的通信。通信设备在需要时将所需的信息发送到远程监控设备，远程监控设备还可以通过该接口来配置智能电源。通信可以通过有线电缆或者是无线的方式，取决于它所在的区域所采用的标准或者是立法要求。[⊖]

1.2 通信接口

智能电表的通信接口负责维护与远距离监控设备的通信。通信设备在需要时

⊖ 此处原文与下面一段的内容重复，似有误。——译者注

将所需的信息发送到远程监控设备，远程监控设备还可以通过该接口来配置智能电源。通信可以通过有线电缆或者是无线的方式，取决于它所在的区域所采用的标准或者是立法要求。

除了这两种基本的组件，智能电表还需要内在集成的微处理器，可被用于嵌入式智能，以及实现诸如 SPI、I²C 等外部接口来连接 LCD 显示器，还有可将数据进行内存读写的高速总线接口，以及智能卡的接口等。本节关注智能电表的能耗测量单元，在下一节将从能耗测量的算法设计讲起。

2 能耗测量算法

通常的电表是通过固定的时间间隔来测量用户所消耗的电流，并乘以当时对应的电压来得到瞬时的功率。测量单元随后提取真实功率信息，随着时间累加，并产生脉冲信号来触发机电设备、LED 或者 LCD 单元。对于智能电表来说，这些信息还需要通过有线或无线通信媒体来与远端的中央设备进行通信。与智能电表相对的，由于存在这样的通信接口，中央设备还可以做到对能耗测量单元进行一定的控制。本节讲述智能电表的能耗测量单元，首先系统地对物理原理进行讲解，然后提取算法并对电路级的实现给出指导。

2.1 数学背景

对于纯正弦曲线的瞬时电压：

$$v(t) = \sqrt{2} |V_1| \cos(\omega t)$$

式中， V_1 为电压的基本幅度； ω 是相应的振动频率。

如果通过该电压来驱动线性负载，相应的瞬时电流可以表示为

$$i(t) = \sqrt{2} |I_1| \cos(\omega t + \phi)$$

瞬时功率可以表示为

$$p(t) = v(t)i(t)$$

经过一段时间 T 之后的平均功率定义为

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

总功率可以表示为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} P_{\text{avg}} = |V_1| |I_1| \cos(-\phi)$$

然而对于非线性负载，通过正弦波形的电压驱动，瞬时电流的表达式为

$$i(t) = I_0 \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} |I_n| \cos(n\omega t + \phi_n)$$

相应的 RMS 电流表示为

$$I_{\text{rms}}^2 = |I_1|^2 + [I_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |I_n|^2] \quad (8.1)$$

功率的复数表示形式为

$$S_{\text{rms}}^2 = V_{\text{rms}}^2 I_{\text{rms}}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

式中, P 和 Q 分别为有功功率和无功功率; D 为功率畸变:

$$D^2 = S_{\text{rms}}^2 - (P^2 + Q^2) = S_{\text{rms}}^2 - V_{\text{rms}}^2 |I_1|^2$$

$$D^2 = V_{\text{rms}}^2 \{ I_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} |I_n|^2 \}$$

依据上述数学分析, 面临很多问题需要解决, 其中最重要的就是对于非线性的负载其电流的消耗情况, 下面的内容给出了具体的描述。

2.1.1 非线性负载的电流消耗: ω_n 的测量

对于式 (8.1), 其中有无穷多的谐波分量以二次方的形式需要加以合并。在具体实现中, 各种测量协议均将电流的最高谐波分量限定为 19 次。这种约束是强制的, 意味着测量单元对于电流 (以及电压) 的测量需要将 3dB 截止点设在 $50\text{Hz} \times 19 = 950\text{Hz}$ 处 (欧洲标准) 或 $60\text{Hz} \times 19 = 1140\text{Hz}$ 处 (北美标准)。

2.1.2 非线性负载的电流消耗: I_0 的测量

对于式 (8.1) 中的 I_0 , 它对于的 ω_n 测量非常重要, 它是驱动非线性负载的基础结果。在参考资料 [1-4] 中给出的现代能源测量 SoC 中, I_0 几乎无法测量, 因为在电流输出通道使用了高通或陷波滤波器 (同时在电压通道使用了相应的相位校正滤波器以便对这两个通道的相位进行匹配)。由于无法测量 I_0 , 尽管 ω_n 的测量可以进行, 但它已经不那么重要了。该问题的解决方案见 Adhikari、Zaidi 和 Grimm 的论述^[5]。

2.2 算法设计

至此已经讨论完成了开发能源测量算法所需的数学背景, 为进行算法开发, 需开发出采样规范。在之前的讨论中已提到对于一个通用的能耗测量单元 (同时满足欧洲和北美的标准), 3dB 需要的截止频率为 $60\text{Hz} \times 19 = 1140\text{Hz} \approx 1200\text{Hz}$ 。也就是出于采样效率的考虑, 带宽需要为 $2\text{kHz} \approx 2048\text{Hz}$, 因此采样频率需要为 $2 \times 2048\text{Hz} = 4096\text{Hz}$ 。

算法 1: 能量计算

```
1: function POWER(i, v) // i 为瞬时电流, v 为瞬时电压

2: static Pavg ← 0
3: p ← v × i
4: Preal ← LPF(p)
5: Pavg ← Pavg + Preal
6: return Pavg
7: endfunction
```

顶层的能量测量算法见上述算法 1，首先顺时电压和瞬时电流相乘得到瞬时功率，其结果再通过 LPF（Low Pass Filter，低通滤波器）来得到有功功率信息。由于低通滤波器在截止频带的表现不够理想，对于有功功率会产生非零频率成分的泄漏，这可以通过长时间对有功功率进行累加来抵消掉，累计的结果可被称为“平均功率”。算法 1 中的函数 POWER 需按照采样频率 4096Hz 来调用。算法 1 的快速实现已由 Scilab 采用双精度完成，结果如图 8.1 所示。图 8.1a 给出了输入电压以及适当进行相位偏移的电流，图 8.1b 给出了瞬时功率，图 8.1c 和 d 给出了在 LPF 分别为一阶和三阶情况下的有功功率信息。有功功率的测量误差跟滤波器的阶数成反比，系统的建立时间是跟滤波器的阶数成正比的。下面的内容会关注于该算法的各种细化改进。

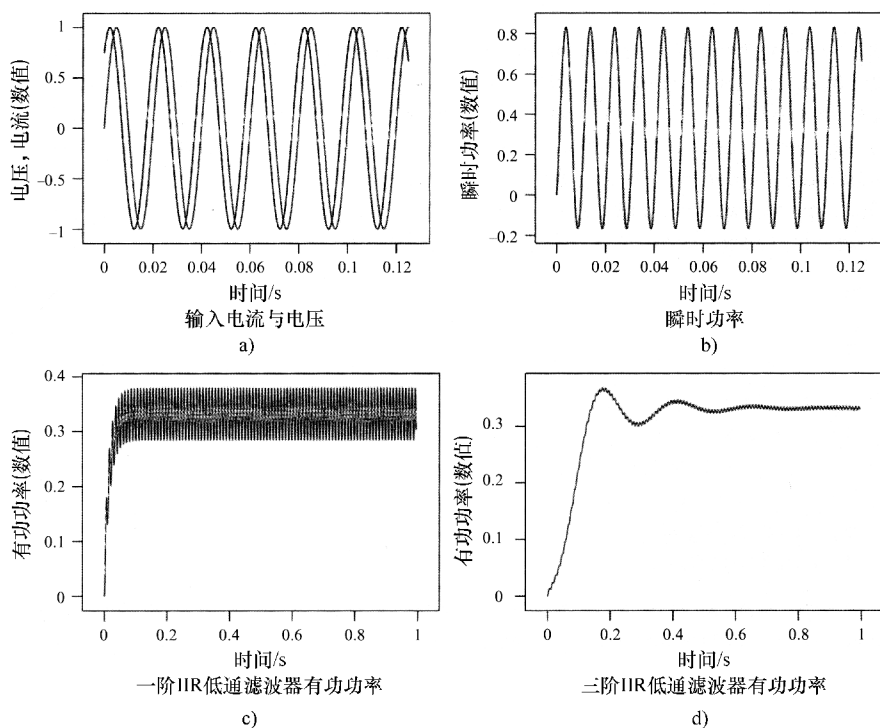


图 8.1 算法的双精度仿真结果

2.2.1 量化细化

算法2：能量计算算法—加入量化考虑

```

1: function POWER(i,v,Nbits) // i为瞬时电流,
                               // v为瞬时电压,
                               // Nbits为 DSP 的比特宽度

2: static Pavg ← 0
3: iQuantized ← GADC(i,Nbits)
4: vQuantized ← GADC(v,Nbits)
3: p ← vQuantized × iQuantized
4: Preal ← LPF(p)
5: Pavg ← Pavg + Preal
6: return Pavg

```

算法3：通用ADC(Analog-to-Digital Converter, 模-数转换器)算法

```

1: function GADC(inp,Nbits) // inp为数值输入,
                             // Nbits为 DSP 的比特宽度

2: Val ← int((2Nbits-1) × inp)
6: return Val
7: endfunction

```

算法1给出了简单的双精度算法结构,需要在以下方面进行细化:

- 1) 依据系统所需的比特宽度;
- 2) 在信号通路中 ADC 的位置。

这可由对输入进行量化来解决,算法2给出了对输入信号进行量化的方法,其中用到了算法3中给出的通用ADC函数。 N_{bits} 需要确切了解DSP的比特宽度才能进行最有效估计。进一步还需要在该阶段了解LPF系数的比特宽度,在此设LPF为如下传递函数所描述的IIR滤波器:

$$A(z) = \left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{a_0 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}} \right]$$

以及下述转换:

$$\begin{aligned} \hat{b} &= \text{int}(2^{N_{\text{bits}}} \times b_i) \\ \hat{a} &= \text{int}(2^{N_{\text{bits}}} \times a_j) \end{aligned}$$

对于相关系数 $\{a\}$ 和 $\{b\}$, 在系统中对其进行仿真并检查误差, 会提取出滤波器的完整系数。注意其中使用的参数是 $2^{N_{\text{bits}}}$ 而不是 $2^{N_{\text{bits}}}-1$, 这是故意选取的, 并且在大多数情况下 a_0 是一个单位元素 (即使不是单位元素, 也可以把它归一化), 因此除法可以替换为向右移位。这会带来简化的传递函数:

$$\Omega(z) = \left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{b}_i z^{-i}}{\hat{a}_0 + \sum_{k=1}^{M-1} \hat{a}_k z^{-k}} \right]$$

对于 N_{bits} 的选择, 由于 $\Lambda(z)$ 和 $\Omega(z)$ 非常相似, 需要注意简化为 $\Omega(z)$ 不会违背系统规格或误差要求。

设计者需要注意由于相关系数的量化而带来的坐标偏移和频率响应的变化, 因此在每一个新的相关系数量化操作之后, 需要进行稳定性分析以及频率响应观测来确保满足需求。对输入和滤波器进行量化之后, 精度将不会是无限大, 所以系统的动态范围需要限制, 因此需要通过仿真来确定系统的动态范围对于给定的需求是否足够。如果不够, 则需要采取适当的措施来满足需求。下面的内容会进一步讨论该问题并且给出在系统设计过程中所能遇到的各问题的解决方法。

2.2.2 为所需的动态范围进行细化

在开始之前想要提到的是, 目前是将 SciLab 的实现转化为 SystemC - AMS 实现的最佳的阶段, 从而可以实现更为严格和具体的分析。另外使用 SystemC 的数据类型可以获得对 DSP 的准确的比特宽度需求, 例如需要在指定的误差 E_r 要求下测量高至 V_H 低至 V_L 的输入信号 $V_{\text{in}}(t)$ 。真实的系统误差 ε_r 是 $V_{\text{in}}(t)$ 的函数, 使得 $\varepsilon_r = \varepsilon_r(V_{\text{in}})$, 设计者需要保证 $\varepsilon_r \leq E_r$ 。影响该等式的主要因素如下:

- 模拟信号通路的 SNR 和 SFDR;
- 当 $V_{\text{in}}(t)$ 接近 V_L 边界时的有效比特数。

第一个问题可以通过对 AMS 信号通路的精细设计来解决。第二个问题可以在测量通道中使用放大器 [更精确地说为可编程增益放大器 (PGA)] 来解决, 以此来提升幅度的低段范围 (就电流测量通道来说)。在该阶段设计者需要了解对 PGA 的增益需求, 这可以通过仿真来获得。

2.3 ADC 的设计

在算法中还用到了通用 ADC, 有很多种类的 ADC 可以满足要求。具体需求是 16bit, 低采样率的 ADC (比特宽度可从前述的算法中获得)。在本书中关注的是一种 16bit 的二阶 $\Sigma - \Delta$ ADC, 这种 ADC 包含两个部分:

- 过采样的时间离散调制器;
- 降采样的滤波器。

图 8.2 中的单比特二阶 $\Sigma - \Delta$ 离散时间模型, $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别为一阶和二阶积分器, $D(z)$ 是单比特 DAC 的传递函数, ε_Q 是量化器引入的白噪声 (量化误差)。该模块的输入—输出转移函数为

$$Y(z) = \left[\frac{A(z)B(z)}{1 + B(z)D(z) + A(z)B(z)D(z)} \right] X(z) + \left[\frac{1}{1 + B(z)D(z) + A(z)B(z)D(z)} \right] \varepsilon_Q$$

$$Y(z) = \text{STF}(z)X(z) + \text{NTF}(z)\varepsilon_Q \quad (8.2)$$

其中

$$\text{STF}(z) = \left[\frac{A(z)B(z)}{1 + B(z)D(z) + A(z)B(z)D(z)} \right]$$

$$\text{NTF}(z) = \left[\frac{1}{1 + B(z)D(z) + A(z)B(z)D(z)} \right]$$

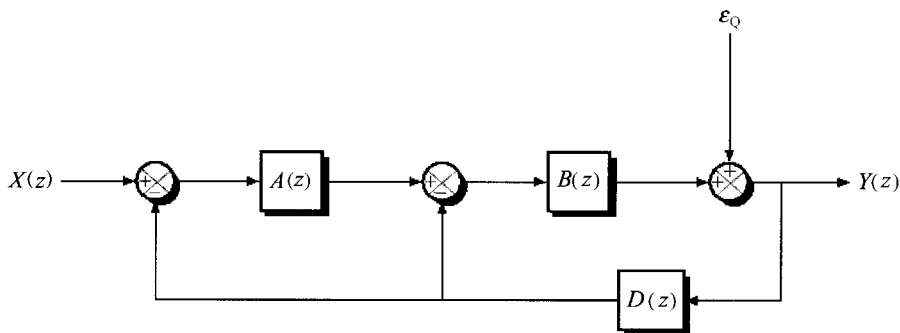


图 8.2 二阶 $\Sigma - \Delta$ 调制器的离散时间模型

输出有两个部分， $\text{STF}(z)$ 处理输入信号，被称为信号传递函数（Signal Transfer Function, STF）， $\text{NTF}(z)$ 处理量化噪声，被称为噪声传递函数（Noise Transfer Function, NTF）。设计者需要关注如下方面：

- $A(z)$ 、 $B(z)$ 和 $D(z)$ 的选取需要使得 $\text{NTF}(z)$ 达到与系统传递函数相关的调制器所需的传递函数；

- $A(z)$ 、 $B(z)$ 和 $D(z)$ 的选取需要使得 ε_Q 最小化；

- $A(z)$ 、 $B(z)$ 和 $D(z)$ 的选取需要使得 $\text{STF}(z)$ 稳定，并且使得极点都分布在单位圆内。

例 1 设计一个多通二阶 $\Sigma - \Delta$ 调制器，给定：

$$A(z) = \frac{az^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

$$B(z) = \frac{bz^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

$$D(z) = 1$$

则式 (8.2) 的 $\text{STF}(z)$ 简化为

$$\text{STF}(z) = \frac{abz^{-2}}{1 + (b-2)z^{-1} + (1+ab-b)z^{-2}}$$

$$\text{NTF}(z) = \frac{(1 - z^{-1})^2}{1 + (b-2)z^{-1} + (1+ab-b)z^{-2}}$$

为了使 $\text{STF}(z)$ 的所有极点都分布在无限远处, 则

$$\begin{aligned} b - 2 &= 0 \\ (1 + ab - b) &= 0 \end{aligned}$$

解方程的结果可以得到 $b = 2$ 以及 $a = 0.5$ 。在等式中替换 a 和 b , 对于 $\text{STF}(z)$ 和 $\text{NTF}(z)$ 分别得到:

$$\begin{aligned} \text{STF}(z) &= z^{-2} \\ \text{NTF}(z) &= (1 - z^{-1})^2 \end{aligned}$$

在此将关注 $\Sigma - \Delta$ ADC 的数字/DSP 部分。 $\Sigma - \Delta$ ADC 是过采样 ADC, 与奈奎斯特 ADC 不同, 它的模拟电路部分使用过采样的速率, 随后再经过降采样来达到基带处理所需的采样速率。设 F_S 是 $\Sigma - \Delta$ 调制器的采样频率, F_B 是基带采样频率, 则降采样率为 $R = F_S/F_B$ 。数字降采样器就是一种前端加入了低通抗混叠滤波器的降采样器。低通滤波器的作用是去除调制器所引入的高频分量, 这样会得到几乎没有量化噪声的 ADC。降采样率通常都很高, 并且对调制器输出进行降采样所用的低通滤波器的要求会很严格, 需要很高的相关性, 因此电流消耗的需求非常大。对于该问题, Hogenauer 已经给出了实际的解决方案^[6,7], 他所建议的方案可以通过图 8.3 来理解, 设输入信号 $X(z)$ 需要按比率 R 来降采样, 为此在其中安放一个降采样率为 R 的降采样器, 降采样器 R 需要增加低通响应的支持来防止信号混叠。在此使用一个简单的低通滤波器, 即积分器。对于带延时的积分响应:

$$H(z) = \left[\frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right]$$

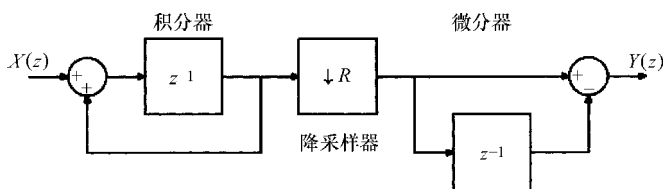


图 8.3 一阶 CIC 滤波器

它的极点在 $\omega = 0$ 时。为补偿这一极点, 使用一个极点在 $\omega = 0$ 的微分器。该结构被称为一阶级联积分梳状 (CIC) 滤波器。CIC 滤波器的阶数是由电路中的积分器 (和/或微分器) 的数量来确定的。对于 N 阶 CIC 滤波器, 它的传递函数定义为

$$H(z) = \left[\frac{1 - z^{-RM}}{1 - z^{-1}} \right]^N$$

式中, M 为差分延迟 (1 或 2)。另外, 注意到:

$$H(\omega) \big|_{\omega=0} = \phi(R, M, N)$$

即对于不同的 CIC 滤波器, 由于 R 、 M 、 N 的值不同, 它们的直流增益也不同。对于有效 P_{bit} 的 CIC 滤波器输出, 需要满足如下条件:

$$6.02P + 1.78 \leq 20 \times \log_{10}(\phi(R, M, N))$$

去除不需要的位最简单的办法是通过移位。CIC 滤波器结构最大的优势是它不需要乘法器, 且寄存器宽度遵循定点运算或整数运算所需的数学关系。对于 N 阶 CIC 滤波器, 降采样率 R 、输入比特宽度 B_{IN} 以及寄存器宽度 (同时也是输出的比特宽度) 之间的关系可以表示为

$$B_{\text{OUT}} = B_{\text{IN}} + N \ln(R)$$

同样, $P \leq B_{\text{OUT}}$, 有效比特数为累加最大增益所需的比特数, 但它不是系统所能给出的真正比特数。系统的真正比特数是由前端的模拟器件决定的, 额外增加比特数则会带来噪声。

对于 L 阶 $\Sigma - \Delta$ 调制器, 通常的规律是 CIC 滤波器的降采样输出为 N 阶, 关系为 $N = L + 1$ 。CIC 滤波器是一种不需要乘法器的降采样器, 低频段表现好, 这种不需要乘法器的方案在系统传递函数方面还表现出可控性, CIC 滤波器标准的严格执行可以得到与 $\{R, M, N\}$ 有确定关系的传递函数。在此继续讨论。对于表 8.1 中给出的系统参数, 如果使用表 8.2 中所列参数的 $\Sigma - \Delta$ ADC, 在经过 CIC 滤波器之后, 1200Hz 处的衰减为 4dB, 比要求多出 1dB。另外在通带特性方面, 由于 CIC 滤波器的引入会产生渐近的下降, 这种现象被称为下降偏差。通常情况下, CIC 滤波器所引入的下降偏差需要被纠回来。纠正该偏差所用的方法是与 CIC 滤波器串联一个纠偏 FIR 滤波器。图 8.4 给出了典型的下降纠偏 FIR 的频响特性, 设计使用的系数是 45。人们也探索了更现代的方法以得到更好的通带和阻带响应^[8]。FIR 滤波器通常使用的系数很高, 因此电流的需求会很高。为在更严格的条件下工作, 可以使用 IIR 滤波器下降纠偏滤波器, 该滤波器使用的系数小一些, 通带和阻带的特性会更好一些。但如果对处理速度要求很高 (例如模式切换), 则不建议使用 IIR 滤波器。

表 8.1 系统规格

规格参数	数值
基带采样频率	4096Hz
3dB 截止频率	1200Hz
通带纹波	0.1dB
阻带衰减	60dB

表 8.2 $\Sigma - \Delta$ ADC 规格

规格参数	数值
过采样频率	4096kHz
CIC 滤波器降采样率	1024
CIC 滤波器阶数	3
CIC 滤波器差分时延	1

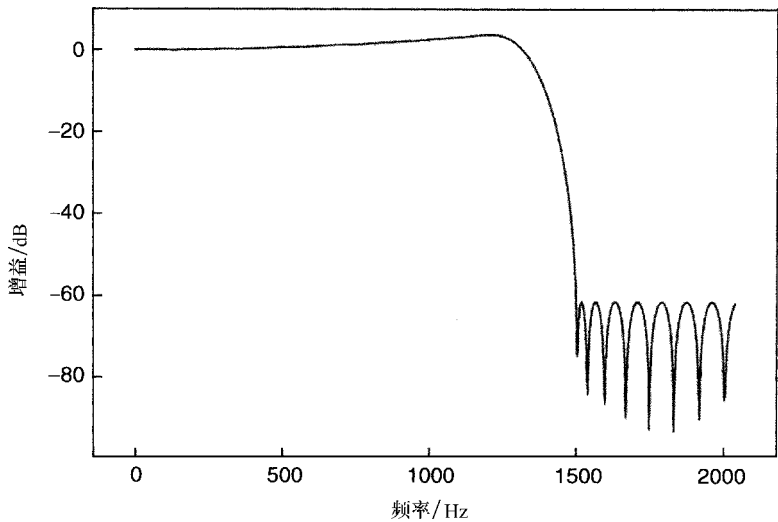


图 8.4 下降纠偏 FIR 滤波器

2.3.1 通过参数缩放细化算法

为了取得所需的系统传递特性、系统的抗噪性能以及获得系统的线性，关键点是要设计一个完美的 $\Sigma - \Delta$ 调制器。 $\Sigma - \Delta$ 调制器本身具有线性特征，所以很自然地会被应用。对 $\Sigma - \Delta$ 的离散时间分析所得到的系数呈现为调制器的小信号模型。具体实现的调制器中，其积分器是与供电电压 (V_{DD} 和 V_{SS}) 以及参考电压 (V_{REF+} 和 V_{REF-}) 相关联的。也就是说，给定集合 $\{V_{DD}, V_{SS}, V_{REF+}, V_{REF-}\}$ ，对于相关系数为 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$ 的积分器，可能会存在调制器中有一个或多个积分器超出供电电压的情况。这一点需要通过一个适当的离散时间模型来分析指定的 $\Sigma - \Delta$ 调制器是否存在该问题。这里所说的适当的模型是指采用的小信号算法模型需要修改为能够支持供电饱和以及提供电压参考。在信号运行在大幅摆动的边缘时也会表现出一定的饱和，但它不应与上述效应进行混淆。假如积分器动态范围超出，需要对相关系数进行修改来匹配变化，在很多情况下需要对相关系数等比例缩减就可以做到。该问题在很多其他文献中都是在靠后的

阶段被讨论及修复，但这里的方案是在这个算法设计阶段就修复该问题。

2.3.2 对器件偏差进行算法细化

在模拟电路信号处理路径中每个模拟器件都会产生器件偏差，这是由于器件之间不匹配产生的。每个器件所产生偏差的具体值目前还不明确，因为具体电路还没有设计。即使是已经设计好了电路，不同的半导体器件个体也具有不同的偏差。这一点可通过图 8.5 中的非常基础的差分放大器来进行理解。设图中差分器件对所用的 M_1 和 M_2 是完全相同的，因此：

$$I_{D1} = I_{D2} \quad (8.3)$$

并且

$$I_{D1} + I_{D2} = I_{SS} \quad (8.4)$$

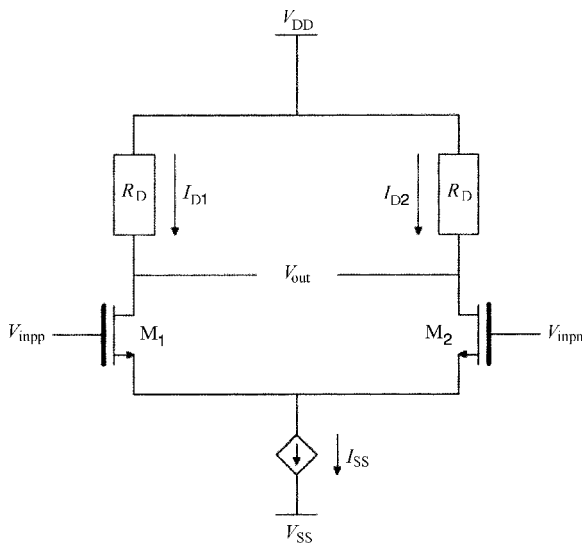


图 8.5 差分放大器的原理图

在该条件下，如果输入信号的摆幅超过通常模式电压 V_{CM} ，则输出信号的摆幅也会超过同样的通常模式电压（在 R_D 的值适当的情况下）。可是在工厂制造时，由于操作原因两个电阻器 R_D 的阻值并不完全相同， M_1 与 M_2 也并不完全一样。在此情况下，式 (8.4) 仍成立，但式 (8.3) 无法成立。这会带来通常模式输出电压的漂移，设为 $V_{CM} + \Delta V$ 。该 ΔV 被称为输出参考电压，如果系统的设计规范的话，它会与输入参考电压成线性关系。给定一个闭环传递函数为 $A_{CL}(s)$ 的差分放大器，设 V_{OS} 为输入参考偏差，则输出参考偏差可表示为

$$\Delta V = A_{CL}(s) V_{OS}$$

在架构设计阶段需要考虑如何设计来抵消参考偏差，这样才能保证最终将其消除。在本书中讨论的器件偏差消除方法为信号斩波技术。斩波是一种容易理解

并广为使用的一种器件偏差消除技术^[9-11]。给定一个输入信号,由时间可变的电压 $V(t)$ 和恒定电压 V_{const} 组合而成:

$$V_{\text{in}}(t) = V(t) + V_{\text{const}}$$

斩波技术首先使用一种时钟信号 $V_{\text{clk}}(t)$ 在器件的输入端进行调制,这通过一对开关可以很容易实现,调制后的输出结果可以表示为

$$V_{\text{in}}^{(\text{mod})} = V_{\text{in}}(t) * V_{\text{clk}}(t) = [V(t) + V_{\text{const}}] * V_{\text{clk}}(t)$$

如果模拟信号部分所产生的总的器件偏差为 V_{OS} ,则在模拟信号通路的输出端信号的表达式为

$$V_{\text{ana}}(t) = [V(t) + V_{\text{const}}] * V_{\text{clk}}(t) + V_{\text{OS}}$$

经过 ADC, $V_{\text{ana}}(t)$ 被转换为数字信号。再次对上述表达式通过 $V_{\text{clk}}(t)$ 进行调制得到:

$$V_{\text{dig}}(t) = [V(t) + V_{\text{const}}] * V_{\text{clk}}(t) * V_{\text{clk}}(t) + V_{\text{OS}} * V_{\text{clk}}(t) = V_{\text{in}}(t) * V_{\text{clk}}(t) + V_{\text{OS}} * V_{\text{clk}}(t)$$

上式的结果为在输入信号上叠加了经斩波时钟信号调制的器件偏差 (V_{OS})。假定使用一个理想的低通滤波器,其截止频率低于 $V_{\text{clk}}(t)$ 的频率,将其施加到 $V_{\text{dig}}(t)$ 信号上,可以得到:

$$V_{\text{out}}(z) = H_{\text{LPF}}(z) V_{\text{dig}}(z) = V_{\text{in}}(z)$$

可以观察到一个有趣的现象,通过斩波和去斩波的处理,器件偏差被消除了,并且这一过程并不需要压缩输入直流电压的幅度。当想要测量式 (8.1) 中的 I_0 以及想要精确测量失真功率时,使用这一方法效果更明显。斩波时钟频率要至少为采样频率的两倍,通过丢弃高频的信号可以有效地消除器件偏差,斩波频率越高,效果越好。但随着斩波时钟频率的升高,电流通道的 PGA 设计需求以及电压通道的缓冲设计需求 (尤其是对于最高增益要求的 PGA) 将会变得更加严苛。并且随着斩波时钟频率的增加,为了在调制器的输入端得到稳定的数据,PGA 的带宽要求也要增加。对于 PGA 带宽选取的经验法则是使其大于等于 20 倍的斩波时钟频率,在 PGA 工作在最高增益时也是如此。PGA 的增益值越高,模拟电路的设计难度越大。一旦选定了斩波时钟频率,就可以在信号通路中加入斩波与去斩波的处理。斩波电路应该加在信号输入端紧靠在 PGA 与缓冲电路之前 (在斩波之前不必要添加 PAD,因为输入信号直接驱动 PGA/缓冲电路 MOSFET 的栅极,在这一端看到的阻抗很高)。在每个测量通道中使用一对开关就可以很好地实现所需的功能,前提是它们所引入的极点要么位置很远,要么已经被设计者处理掉。这些开关还需要足够高的 W/L 比率以保持线性,但又不能太高,以使得它的动态范围受制于它的通道电容。去斩波电路可以加到紧靠在 $\Sigma - \Delta$ 调制器的输出端。但 $\Sigma - \Delta$ 调制器通常都有很高的带宽,这会迫使去斩波的输出带宽居高不下,带来严重的信号串扰。另

一选择是将去斩波安排在 CIC 滤波器之后。对于表 8.2 给出的 CIC 滤波器, 降采样率为 1024, 表示其带宽非常低。如果使用斩波频率为 8, 则在 CIC 滤波器的输出端数据无法稳定 (也就是去斩波的输入数据无法稳定), 这样如果在 CIC 滤波器的输出端进行去斩波的话将会得到很差的 SNR。因此一种周到的做法是将降采样率为 1024 的 CIC 滤波器拆分为两个 CIC 滤波器 (CIC - 1 和 CIC - 2), 其降采样率分别为 R_1 和 R_2 , 使得

$$R_1 + R_2 = R = 1024^{\ominus}$$

并且 CIC - 1 滤波器的带宽需要足够高以便匹配斩波后的信号。在具体实现中会选取 CIC - 1 滤波器的降采样率尽可能低 (也就是带宽尽可能高) 以适应斩波电路的高频率。如果 DSP 的比特宽度要求为 W bit, 设计者则需考虑要将 CIC - 1 滤波器的输出比特宽度设为 W bit。为满足以上条件, R_1 的值可以确定下来。对于 1024 的降采样率以及 16bit 的系统宽度, $R_1 = 64$ 以及 $R_2 = 16$ 就是很好的选择。

关于斩波, 还有一个问题需要解决, 如果斩波和去斩波的时钟是同源的话, 由于 $\Sigma - \Delta$ 调制器、CIC - 1 滤波积分器、降采样器和差分器电路所引入的时延, 在解调制时会有信号不匹配的问题, 结果会导致 SFDR 很差。抵消这一问题的一种做法被称为时延匹配。根据表 8.2, CIC - 1 滤波器和 CIC - 2 滤波器都是三阶 CIC 滤波器, 因此 CIC - 1 滤波器包含三个差分器, 设差分器时延 $M = 1$, 则 CIC - 1 滤波器通过差分器所引入的群时延为 $1/2 + 1/2 + 1/2 = 3/2$ 个时钟周期。首先需要把这个非整数的群时延转换为一个整数, 设 $R_1 = 64$, 为了多增加 $1/2$ 的时延, 可以在 CIC - 1 的前端引入 $z^{-N} = 64/2 = 32$ 的时延。但是在 $\Sigma - \Delta$ 调制器内部还有以时钟频率 F_s 为周期的两个周期的时延, 考虑到 CIC - 1 滤波器的每个积分器各一个单位时延以及降采样器有一个单位时延, 这样需要从 z^{-N} 中减去 $2 + 3 + 1 = 6$ 个周期的时延, 即 $z^{-N} = 32 - 6 = 26$ 个时延, 因此在 CIC - 1 滤波器的输入端需要有 26 个周期的时延。这样就会在去斩波电路的输入端得到准确的两个以 CIC - 1 滤波器输出采样率为周期的两周期时延。也就是说, 为了在去斩波处理时匹配所发生的时延, 去斩波电路的时钟需要从斩波电路的时钟基础上插入两个周期的时延获得。时钟获取的操作如图 8.6 所示, 图中显示的是电流测量通道。对于电压测量通道也是同样的结构, 只是其中的 PGA 需要被替换为单位增益缓冲器。完整的算法需要通过 SystemC AMS 来开发并需要对结果验证。图 8.7 给出了能耗测量系统的完整的顶层算法结构图。

$\ominus$ 因为两级串联此处意为 R_1 与 R_2 相乘。——译者注

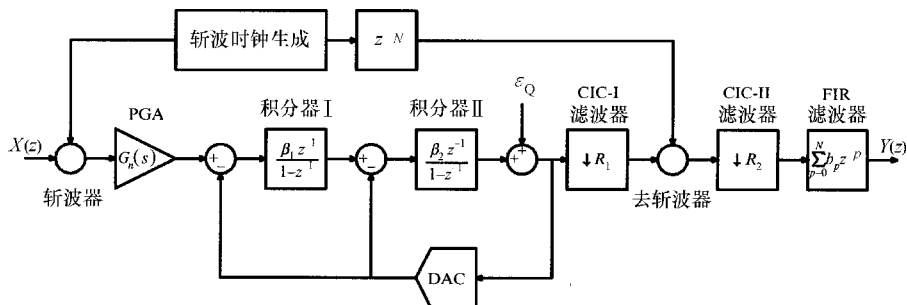


图 8.6 能耗测量设备电流测量通道的算法原理图

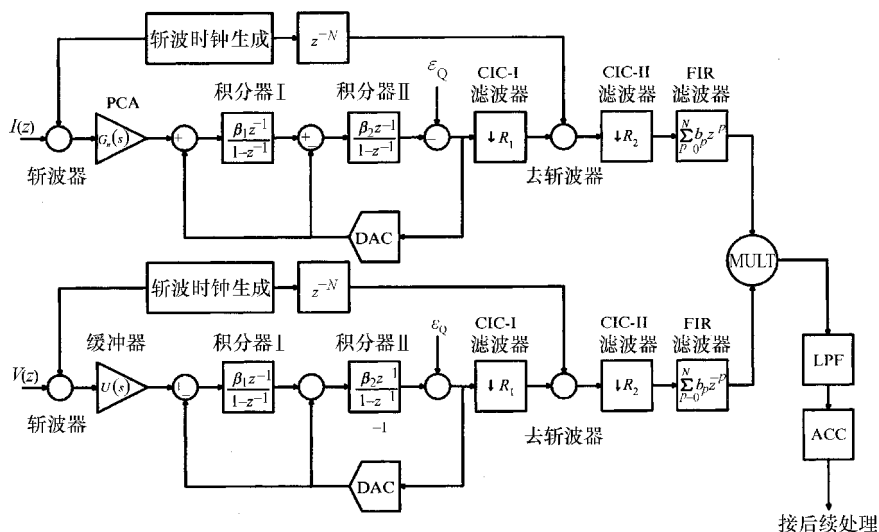


图 8.7 能耗测量设备算法原理图

电流测量通道的输入信号 $I(z)$ 首先通过传递函数为 $G_n(s)$ 的 PGA, 然后经过二阶的 $\Sigma - \Delta$ ADC。电压通道的输入信号 $V(z)$ 首先通过传递函数为 $U(s)$ 的单位增益缓冲器, 然后经过二阶的 $\Sigma - \Delta$ ADC。除了 PGA 和缓冲器之外, 两个通道必须完全一致, 这样两者的输出信号相位差才会小到可以忽略的程度。通过各通道的斩波操作, 消除了由模拟器件所引入的器件偏差, 这样就无需像参考资料 [1-4] 中所介绍的那样在电流通道的 ADC 输出端加入高通滤波器和在电压通道加入相位校正器。两通道的 ADC 输出随后通过乘法器, 两者相乘以得到瞬时功率信息, 再经过低通滤波器得到有功功率信息。累加器的作用是从有功功率信息中提取平均功率信息, 并将处理结果传送到后续处理模块。对于电流测量通道, 还有一个有趣的需求, 跟它所工作的地理区域有关。设想一种情景, 有人故意将

电能表的电流输入端与输出端短路以使得电流主要从短路通道流过,这样就会使电能表测量的功率远远低于实际消耗的功率。偷电的用户通常会做这样的电路改装,很多地域都会有需求来保护测量设备防止这样的偷窃行为。防窃电保护的实现可以采用两个电流通道,一个接入相线,一个接入零线,测量两者的差值,再通过多路复用器输出两者的测量结果,由控制电路来确保复用器的输出始终是选用电流测量结果最大的那个通道。并且如果两者的差值超过一个阈值的话,可以将寄存器的一个位置位(以及/或者将电能表的一个LED点亮)以此来表明捕捉到了窃电行为以及/或者窃电企图。第3节将详细讨论能量测量设备的系统架构设计,该讨论假定读者已具备足够的背景知识。

3 系统架构设计

对于既包含半导体电路又包含软件的系统来说,想要一次性完成系统设计需要精确与充分的设计,这一向是很有挑战性的。如果系统的目标是一块独立的芯片的话,这一要求就会更加严格。在一个单一的组织中设计者的团体可以分为模拟电路设计者、DSP设计者、数字电路设计者以及嵌入式软件设计者,他们遵循不同的方法论,使用不同的工具组。他们之间进一步会由于不同的专长与知识而相互隔离,使他们无法认知系统的整体以及对方所面对的问题和局限。在现阶段为了一次性完成设计,可用的最佳方案被称为联合仿真,它允许在非常靠后的阶段将不同设计组所设计的模块进行联合仿真。在这一阶段所发现的问题通常不算是设计优化,而是通过缺陷修复或者是打补丁来实现。

就纯数字领域来说, SystemC 属于确立的 HDL,有完善的方法论体系,而模拟/DSP/数字/软件系统则需要培养新一代的设计者。新的 SystemC AMS^[12]界定了模拟/DSP/数字/软件系统的仿真,同时提供了模拟干涉建模、优化参数提取以及 AMS 各模块的精确规格提取。使用 SystemC AMS 逐渐成为一种趋势,例如 Spice,混合模拟信号系统设计曾是它的弱项。使用像 SystemC AMS 这样的嵌入式混合模拟信号语言(Embedded Analog Mixed Signal, EAMS)最好的方法就是在最高层抽象设计阶段就将电路级别设计的问题考虑进来。有了 SystemC AMS,最大的挑战则是开发出一套目前还没有的 EAMS 系统及设计/优化方法论。尽管已有了通过 SystemC AMS 进行建模的方法论^[13],并且联合仿真的方法论也有介绍^[14],可由于各种方法论都是逐渐进化的,在 EAMS 设计领域中需要完成越来越多的设计。

本节将讨论智能电表的能量测量单元基于非理想模型使用 SystemC AMS 的系统架构,并给出电路设计的指导方针。

3.1 PGA/缓冲器的设计

可编程增益放大器 (Programmable Gain Amplifiers, PGA) 用于在信号处理数据通路对传感器输出的低电平信号进行精确放大。数字 PGA 则使用廉价的手段例如模 - 数转换以及多路复用。它的实现可以使用图 8.8 中的运算放大器 (OPAMP)、开关电路网络以及开关驱动电路。PGA 在信号处理通路中是最重要的器件, 因为它决定了信号通路的 SNR 性能瓶颈, 以及总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD)。图 8.8 给出了托比所发明的 PGA 的一般模型原理图。图中的输出 V_{out} 是反转的, 而在具体实现中由于差分 OPAMP 输出信号的反相可以得到非反转的 PGA。在 AMS 系统架构设计时有效地采用非理想模型的 PGA 需要考虑以下九个方面:

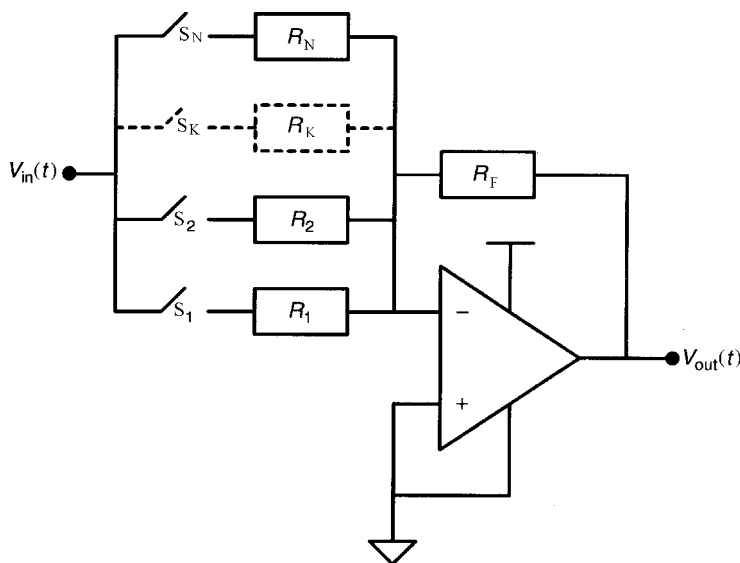


图 8.8 托比 (Tobey) 所发明的 PGA 电路原理图

- 1) 有限增益;
- 2) 有限带宽;
- 3) 开关与电阻噪声;
- 4) 非线性增益;
- 5) 输入相关噪声;
- 6) 输入相关偏差;
- 7) 摆率;
- 8) 供电饱和;
- 9) 供电噪声与 50Hz 泄漏。

尽管对 PGA 进行详细的建模超出了本书的范围,但仍会给出 PGA 粗略建模所用的增益带宽公式,闭环增益带宽可表示为

$$H_{CL}(s) = \frac{R_F \left(\sum_{i=1}^N 1/(R_i + R_i^{\text{mos}}) \right)}{1 + \frac{R_F}{A_{OL}} \left(\sum_{i=1}^N 1/(R_i + R_i^{\text{mos}}) \right) \left(\frac{1}{2\pi F_{OL}} \right) s} \quad (8.5)$$

式中, R_i^{mos} 为 PGA 的第 i 个 MOS 开关的阻抗; A_{OL} 为开环增益; F_{OL} 为 OPAMP 的开环带宽。

根据第 i 个开关的不同状态,第 i 个开关的阻抗可表示为

$$R_i^{\text{mos}} = \begin{cases} R_{\text{off}}; & S_i \rightarrow \text{OFF} \\ R_{\text{on}}; & S_i \rightarrow \text{ON} \end{cases}$$

对于互补 MOS 开关, NMOS 与 PMOS 互相对等:

$$R_{\text{on}} = \frac{R_{\text{onp}} R_{\text{onn}}}{R_{\text{onp}} + R_{\text{onn}}}$$

上式为 CMOS 的电路导通阻抗公式,则

$$R_{\text{oni}} = \frac{1}{\mu C_{\text{ox}} (W/L) [V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}} - V_{\text{DS}}]}$$

R_{off} 已从电路级别仿真中得到。有兴趣的读者可参阅文献 [15] 中所讨论的具体的 PGA 模型。

根据表 8.3 中给出的参数,交流仿真的结果如图 8.9a 所示,选定最高增益为 100 时在 160kHz (适配 8kHz 斩波频率所选择的保守的 PGA 带宽) 没有满足 3dB 截止频率要求。为适配 160kHz 斩波频率需要将 UGB 升级为 20MHz,结果如图 8.9b 所示。需要注意的是,需要式 (8.5) 为单极点系统,设计要求如此,电路的设计者需要恰当地处理多余的极点。在图 8.9b 中还保留了保护带宽,这是一种推荐的办法,为电路设计者留出了余量。对于增益为 100 的 PGA 其暂态仿真结果如图 8.10 所示,输入信号幅度为 500mV 时图中给出了全部的大信号效应,使得输出的 SFDR 大约为 90dB,这对于此类的大输入信号是很好的结果。

表 8.3 PGA 参数表

参数	数值
输入电压 (V_{DD})	1.2V
地电压 (V_{SS})	0.0V
OPOMP 开环增益 (A_{OL})	60dB
OPAMP UGB	1MHz
阻抗 (R_1)	10k Ω
阻抗 (R_2)	125k Ω

(续)

参数	数值
阻抗 (R_3)	250k Ω
阻抗 (R_4)	500k Ω
阻抗 (R_5)	1000k Ω
开关关断阻抗 (R_{OFF})	100M Ω
OPAMP 摆率 (S_{RT})	20 μ Vs $^{-1}$
OPAMP 增益非线性 (G_{NL})	50
OPAMP 输入相关噪声 (V_N)	10 μ V

3.1.1 $\Sigma - \Delta$ ADC 的设计

图 8.6 给出了二阶 $\Sigma - \Delta$ ADC 的原理图, 该设计可以满足 16bit 精度能耗测量的需求。在之前的内容中已经讨论过二阶 $\Sigma - \Delta$ ADC 的 DSP 设计, 因此在本节主要考虑低通二阶单比特 $\Sigma - \Delta$ 调制器的模拟电路设计。 $\Sigma - \Delta$ 调制器如果通过稳定的模拟电路来实现的话它本身是线性的, 因此不需要对它所构成的元器件进行修整。然而在模拟电路领域如下因素会对 $\Sigma - \Delta$ 调制器的性能产生影响, 需要在调制器的设计阶段进行优化:

- 1) 采样时钟抖动;
- 2) $k_B T / C_S$ 噪声;
- 3) 开关非线性;
- 4) 积分器的如下非理想特征;
 - ① 积分器泄漏,
 - ② OPAMP 增益带宽,
 - ③ OPAMP 摆率,
 - ④ OPAMP 噪声,
 - ⑤ OPAMP 饱和。

图 8.6 中的 $\Sigma - \Delta$ 调制器所用的积分器是一种开关电容积分器, 可以使用 MOS 开关、OPAMP 以及电容来实现。图 8.11 给出了开关电容积分器的单端结构图。由于采样电容 C_S 所引入的开关热噪声可以表示为

$$e_T(t) = \sqrt{\frac{k_B T}{C_S}} n(t) \quad (8.6)$$

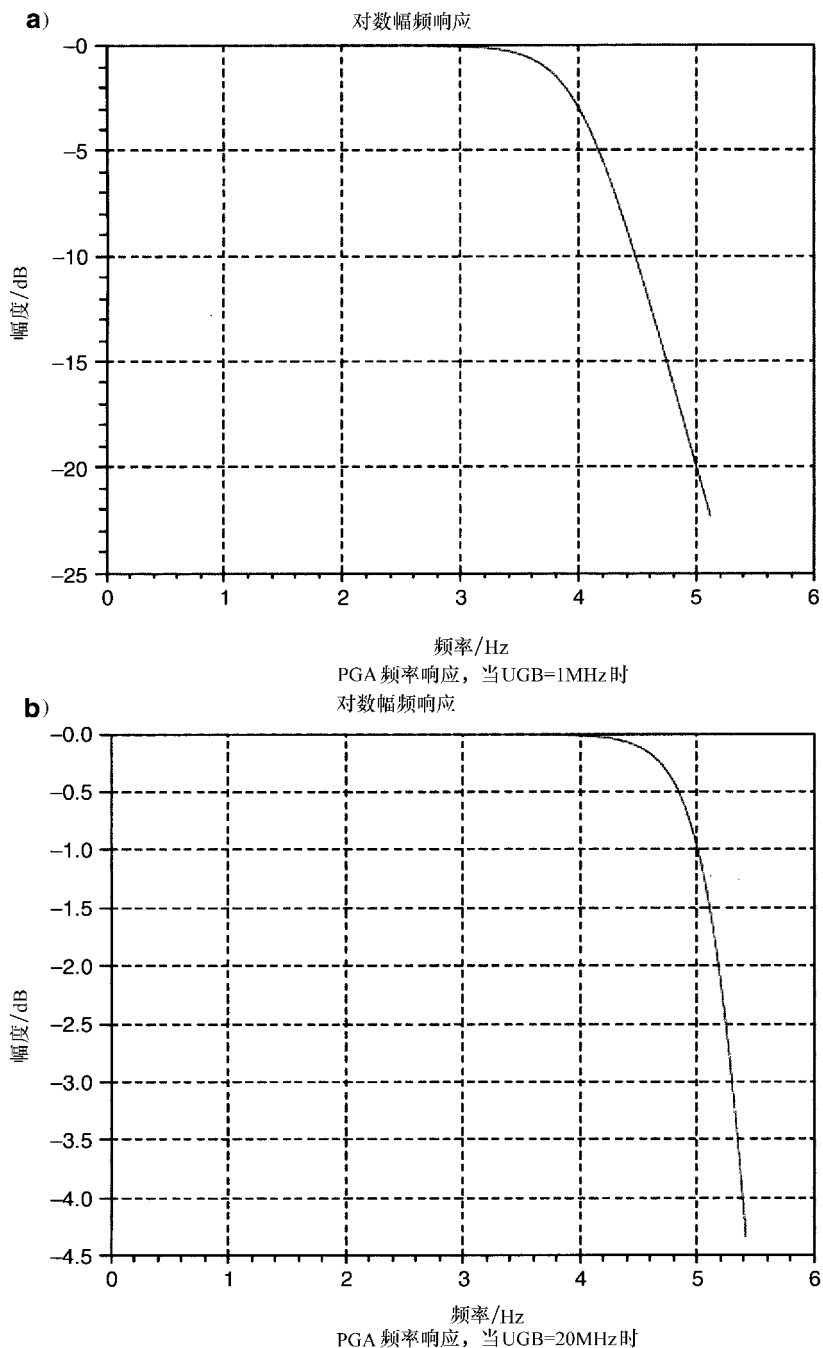


图 8.9 PGA 优化结果

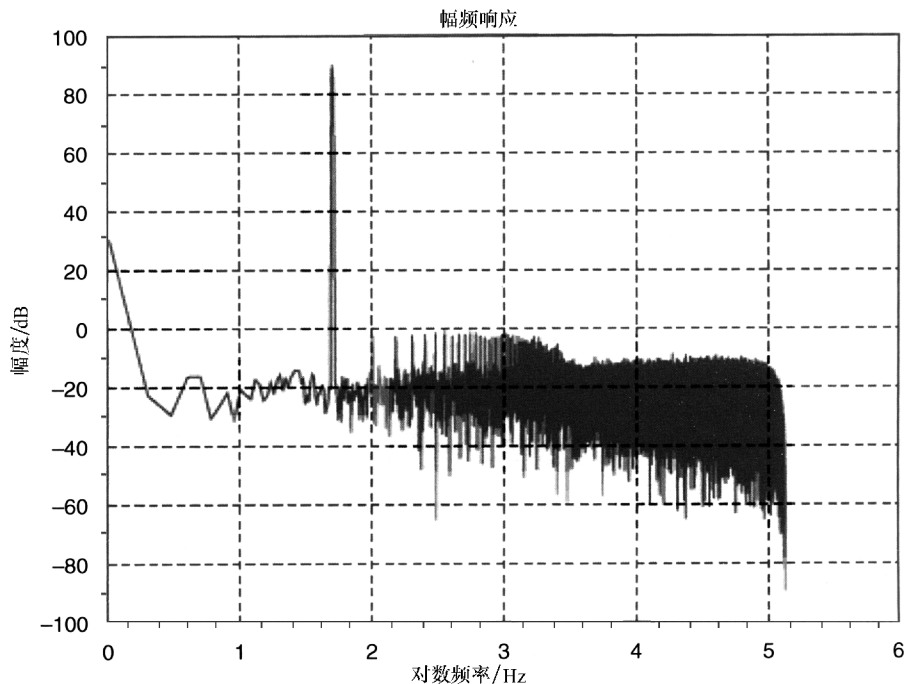


图 8.10 在输入幅度为 500mV 以及 PGA 增益为 100 时的瞬态特性仿真

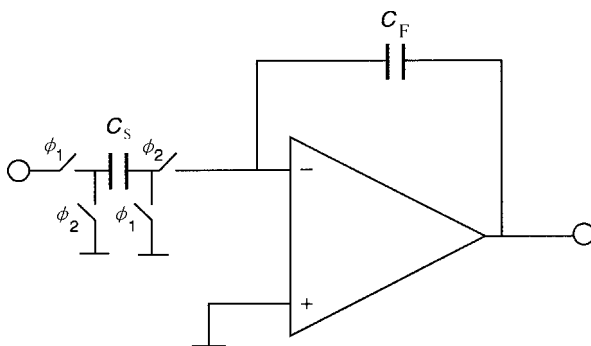


图 8.11 开关电容积分器

式中, k_B 是波尔兹曼常数; T 是绝对温度; $n(t)$ 为 $\mu=0$ 以及 $\sigma=1$ 时的随机化结果。

需要注意的是随着电容值的增加, 热噪声会下降。另一方面由于开关采样所引入的电容器 C_S 上的电压误差可表示为

$$V_{\text{out}}(t) = V_{\text{in}}(t) (1 - e^{-\frac{T_S/2}{2R_{\text{on}}C_S}})$$

式中, T_S 为采样时钟频率; R_{on} 为开关的导通阻抗。

该式表达了开关所引入的非线性, 也说明非线性是随着 C_S 的增加而增加的, 这与式 (8.6) 是相矛盾的。这两种相反的因素表明在调制器的设计以及选取电容器的值时需要认真地进行优化取舍。在调制器中, 量化器的实现可以采用时钟

驱动的比较器或者是采用简单的滞后输出的比较器,以避免量化器的输出由于比较器输入端出现噪声而发生改变。单比特的 DAC 可以使用一对开关来实现,其线性很好(开关器的非线性在其中的影响很小)。感兴趣的读者可以进一步参阅文献[16]中给出的对 $\Sigma-\Delta$ 调制器的建模。图8.12给出了在输入为500mV时对电流通道完整的瞬态特性仿真,得到的SFDR比较理想,为95。还需要说明一下的是,调制器输出端所产生的噪声可被看作类似抖动的相加噪声,当包含噪声的该信号通过由DSP处理的数字采样器和低通滤波器时,噪声表现为非线性,这使得整体的非线性降低。关于这一点的详细讨论感兴趣的读者可以参阅资料[17]。引入该设计的结果可以使信号通道的输出端获得5倍的SFDR增益。因此建议对于模拟信号的处理应始终引入DSP组件来进行分析与优化,因此可以减少信号通路的过设计。

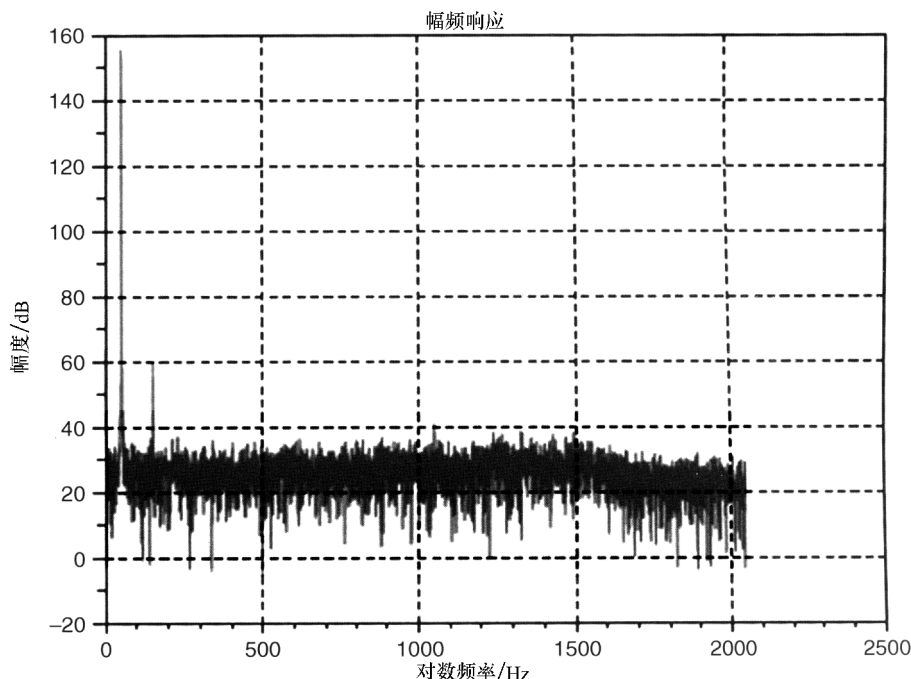


图8.12 输入幅度为500mV、增益为100时的瞬态特性仿真结果

4 小结

本章讨论了智能电表的能耗测量单元,先从规格需求谈起,提出算法来解决这些需求,然后进行细化,形成系统架构等设计,一直到能耗测量单元的电路级设计指导,最后演示了电流测量通道的结果。本章简短的概述可以为致力于设计智能电表能耗测量单元的设计者提供一个起点。

参 考 文 献

1. ADE7751, Energy Metering IC with On-Chip Fault Detection, Analog Devices.
2. AD71056, Energy Metering IC with Integrated Oscillator and Reverse Polarity Indication, Analog Devices.
3. ADE7518, Single-Phase Energy Measurement IC with 8052 MCU, RTC, and LCD Driver, Analog Devices.
4. MCP3905, Energy Metering IC with Active Real Power Pulse Output, Microchip.
5. S. Adhikari, Y. Zaidi and C. Grimm, "Architectural Mitigation for High Performance Energy Measurement," in European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD2011), 2011 I. E. 20th International Conference on, August 2011, pp. 205–208.
6. E. Hogenauer, "A Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation," in Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'80., vol. 5, April 1980, pp. 271–274.
7. E. Hogenauer, "An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 2, pp. 155–162, April 1981.
8. G. Jovanovic-Dolecek and S. Mitra, "A New Two-Stage Sharpened comb Decimator," Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, vol. 52, no. 7, pp. 1414–1420, Jul. 2005.
9. C. Wang, "A 20 bit 25 kHz Delta Sigma A/D Converter Utilizing Frequency-Shaped Chopper Stabilization Scheme," in Custom Integrated Circuits Conference, 2000. CICC. Proceedings of the IEEE 2000, 2000, pp. 9–12.
10. S. Vitali, G. Cimatti, R. Rovatti, and G. Setti, "Algorithmic ADC Offset Compensation by Non-White Data Chopping," in Circuits and Systems, 2007. ISCAS 2007. IEEE International Symposium on, May 2007, pp. 1425–1428.
11. S. Vitali, G. Cimatti, R. Rovatti, and G. Setti, "Algorithmic ADC Offset Compensation by Nonwhite Data Chopping: System Model and Basic Theoretical Results," Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 6, pp. 1615–1627, July 2008.
12. Karsten Einwich, Christoph Grimm, Wolfgang Granig, Gerhard Noessing, Wolfgang Scherr, Serge Scotti, Martin Barnasconi, Giorgia Zucchelli, Alain Vachoux, "Requirement specification for SystemC Analog Mixed Signal(AMS) extensions", Version 2.1, March 8, 2010.
13. M. Farooq, S. Adhikari, J. Haase, and C. Grimm, "Modeling Methodology in SystemC-AMS for Embedded Analog Mixed Signal Systems," in Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Information Technology, ser. FIT'10. Iem plus 0.5em minus 0.4em New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 27:1–27:6.
14. Y. Zaidi, S. Adhikari, and C. Grimm, "Abstract Modeling and Simulation Based Selective Estimation," in Design and Diagnostics of Electronic Circuits Systems (DDECS), 2011 I.E. 14th International Symposium on, April 2011, pp. 275–278.
15. S. Adhikari, C. Grimm, and J. Haase, "Abstract Modelling and Estimation of A High Performance Tobey's PGA," in Specification Design Languages, 2011. IC 2011. Forum on, Sept. 2011, pp. 1–6.
16. S. Adhikari and C. Grimm, "Modeling Switched Capacitor Sigma Delta Modulator Nonidealities in SystemC-AMS," in Specification Design Languages, 2010. IC 2010. Forum on, Sept. 2010, pp. 1–6.
17. S. Adhikari, M. Farooq, J. Haase, and C. Grimm, "High Performance Adaptive Sensor Interface Design Through Model Based Estimation of Analog Non-idealities," in Design and Diagnostics of Electronic Circuits Systems (DDECS), 2011 I.E. 14th International Symposium on, April 2011, pp. 41–4.

本书特色

- 对嵌入式系统在智能电器与能源管理方面的应用给出了综合的多学科介绍;
- 为科研人员以及设计工程师提供了智能电器能耗管理成功设计所必需的信息;
- 内容覆盖配电网络、智能电器的能耗管理、微型发电设备、需求一响应管理、超低能耗待机、智能待机以及家庭与楼宇自动化的通信网络。

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066
读者购书热线: 010-68326294
010-88379203

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com
机工微博: weibo.com/cmp1952
金书网: www.golden-book.com
教育服务网: www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

为中华崛起传播智慧

地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037

策划编辑◎顾谦

国际电气工程先进技术译丛

- 《嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用》
- 《高级测量仪器与计算机I/O设计：精度界定和控制及其工业应用》（原书第2版）
- 《固体氧化物燃料电池的动态建模与预测控制》
- 《氢能源和车辆系统》
- 《纳米技术与能源》
- 《电能效率：技术与应用》
- 《自主移动机器人行为建模与控制》
- 《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
- 《智能电网——融合可再生、分布式及高效能源》
- 《电动汽车融入现代电网》
- 《太阳能照明》
- 《超级电容器：材料、系统及应用》
- 《太阳能发电系统控制技术》
- 《ESD物理与器件》
- 《锂二次电池原理与应用》
- 《风力发电并网运行的无功管理》
- 《超大规模集成电路物理设计：从图分割到时序收敛》
- 《海上风电成本建模：安装与拆除》
- 《智能电网——设计与分析基础》
- 《功率理论与电能质量治理》
- 《混合动力电动汽车原理及应用前景》
- 《智能电网中的传导电磁干扰》
- 《风能转换技术进展》
- 《电机传动系统控制》
- 《储氢材料：储存性能表征》
- 《风力机技术》
- 《小型风力机：分析、设计与应用》
- 《通信系统高电压保护》
- 《磁性测量手册》
- 《ESD设计与综合》
- 《太阳能利用技术及工程应用》
- 《超级电容器的应用》
- 《小型风力机：分析、设计与应用》
- 《太阳能电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
- 《风力发电系统——技术与趋势》
- 《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
- 《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
- 《大规模储能技术》
- 《风电系统电能质量和稳定性对策》
- 《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
- 《传热学：电力电子器件热管理》
- 《现代电力电子学与交流传动》
- 《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
- 《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
- 《储能技术》
- 《光伏系统工程》（原书第3版）
- 《光伏与风力发电系统并网变换器》
- 《先进电气驱动的分析、建模与控制》



机械工业出版社微信服务号

上架指导 工业技术 / 电力技术 / 控制

ISBN 978-7-111-49082-1



9 787111 490821 >

ISBN 978-7-111-49082-1

定价：49.80元